

ДИНАМИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. ТРАНСПОРТНЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.78:504.61

ТЕХНОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ОТДЕЛЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТ НА ЖИДКИХ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА НА ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО И АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ

А. С. Анопка

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В статье раскрывается проблема воздействия на околоземное космическое пространство отделяемых элементов ракетносителей и космических аппаратов на самовоспламеняющихся компонентах топлива; представлены существующие методы решения проблемы, проводимые исследования в данной области различными организациями.

Ключевые слова: самовоспламеняющиеся топлива, космический мусор, околоземное космическое пространство.

І. ВВЕДЕНИЕ

В настоящем мире развитие любой ракетно-космической техники влечет за собой неотъемлемую часть как экологическая безопасность. Несмотря на применение современных методов снижения техногенного воздействия отделяемых частей (ОЧ) ракет-носителей (РН) на окружающую среду [1] на многих типах РН («Союз», «Протон», и т.д.) данная проблема остается.

Но если с отработанными ОЧ удастся решить вопрос экологической безопасности в районах падения, то вот вопрос с остающимися ОЧ в околоземном космическом пространстве пока в настоящее время с максимальным эффектом решить не удастся. Проблема крупногабаритного космического мусора (ККМ) в околоземном космическом пространстве носит международный характер и достаточно полно сформулирована в материалах Межагентского координационного комитета по космическому мусору [2].

Исторически сложилось так, что основными источниками ККМ на околоземных орбитах были:

- 1) самопроизвольные и преднамеренные разрушения на орбите, которые приводят к долгосрочному засорению;
- 2) космический мусор, высвобождаемый умышленно во время функционирования орбитальных ступеней РН и космических аппаратов (КА).

В будущем фрагменты, возникающие в результате техногенного воздействия, столкновений на орбите, как предполагается, станут значительным источником ККМ и с каждым запуском КА все актуальнее.

ІІ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Меры по предупреждению образования ККМ можно подразделить на два направления:

- 1) меры, которые уменьшают образование потенциально вредного ККМ в краткосрочном плане (пуски РН);
- 2) меры, которые ограничивают образование ККМ в долгосрочном плане.

Меры первой категории сопряжены с уменьшением образования ККМ в результате полетов и принятием мер по избежанию разрушений на орбите. Меры второй категории касаются процедур после завершения программ полетов, которые позволяют уводить отработавшие КА и орбитальные ступени РН из районов, плотно загруженных функционирующими КА.

С этой целью Организацией Объединенных Наций был разработан свод Руководящих принципов предупреждения образования космического мусора, который отражает основополагающие элементы существующей совокупности практики, стандартов, кодексов и руководств по этому вопросу, разработанных рядом национальных и международных организаций [3]. В данном документе приведены семь руководящих принципов проектирования, разработки, производства и эксплуатации КА, РН.

Задача – поиск путей решения снижения техногенного воздействия на околоземное космическое пространство.

III. ТЕОРИЯ

В научной литературе предлагается несколько подходов к решению этой проблемы: предлагается использовать мощные импульсные лазеры [4], электродинамические тросовые системы [5], активные КА, предполагающие стыковку со спускаемым объектом [6] или его захват [7].

К данному моменту времени по ряду технологий уже проводятся экспериментальные отработки. Большая работа проведена Японским Национальным агентством космических разработок (JAXA), Агентством по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США (DARPA) [6].

В Омском государственном техническом университете разработан ряд методов, перечисленных в научных публикациях и работах [1, 6, 8, 12-14, 16-17].

Все исследования, проводимые в ОмГТУ, направлены на два направления [8]:

1) разработка автономной бортовой системы спуска для ее установки на ОЧ ступеней РКН, предназначенной для спуска ОЧ после выполнения ими своей миссии, что относится как к ОЧ нижних ступеней ракет, так и ОЧ верхних ступеней РКН;

2) разработка многоразового универсального транспортно-стыковочного модуля для буксировки с орбит ОЧ ступеней РКН, ранее выведенных на орбиты и представляющие собой опасные объекты ККМ.

ОмГТУ совместно с иностранными представителями (университетами Италии) проводит исследования технологии увода пассивного КА (ПКА) за счет активного КА (АКА), имеющего двигательную установку на гибридном топливе [9].

Миссия по уводу ПКА включает стадии выбора ПКА для увода, сближения с выбранным ПКА, захват ПКА с последующим уводом.

Имеет место широкое распространение методов буксировки ПКА на основе использования тросовых систем. АКА снабжается устройством захвата, связанным с АКА посредством троса [10, 11]. После захвата ПКА связка «ПКА–трос–АКА», за счет тяги двигательной установки АКА, совершает маневр увода с орбиты. Работки данной технологии ведутся параллельно Европейским аэрокосмическим и оборонным концерном (EADS Astrium), Колорадским университетом (США), ОмГТУ.

Предложенный ОмГТУ способ стыковки АКА и ПКА [12–14] является сочетанием нескольких известных в настоящее время методов. АКА, снабженный космическим микробуксиром (КМБ) выводится в окрестность ПКА. КМБ, связанный с АКА тросом, совершает маневр к ПКА и осуществляет с ним стыковку. Далее, за счет тросовой системы, производится стягивание АКА, КМБ и ПКА в одну связку и увод за счет двигательной установки АКА образовавшейся связки с орбиты. В [15] сформулированы общие требования по выбору последовательности увода ПКА на основе сравнения критерия, например, вероятности столкновения ПКА с другими космическими объектами, для каждого ПКА. Компенсацию накопленных ошибок параметров движения АКА при предыдущих маневрах, а также системы целеуказания распределяют между корректирующими импульсами АКА на этапе дальнего наведения и на участке самонаведения.

Как одним из перспективных методов решения данного вопроса является управляемый увод ОЧ с орбиты за счет использования остатков топлива в баках [16].

Имеются предложения по использованию остаточных энергетических возможностей верхней ступени РН, в том числе и для её скорейшего управляемого спуска с орбиты. Так, например, простейшим решением может быть изменение направления тяги реактивного сопла и установка его по продольной оси блока. При этом для предварительной стабилизации ступени после отделения КА могут быть использованы ракетные двигатели на твердом топливе. Это позволит изменить модуль орбитальной скорости разгонного блока примерно на 20 м/с, что существенно выше значения скорости, сообщаемой блоку при традиционной схеме работы системы отделения.

Другое решение предлагается в работе [17], где для значительного увеличения импульса реактивного сопла предлагается использовать остатки топлива в баках отработавших ступеней РН с их предварительной газификацией. Как правило, после выключения маршевого жидкостного ракетного двигателя в баках РН остаются неиспользованные остатки жидкого топлива, величины которых составляют 2–3% от величины начальной заправки. В [17] на примере РН «Космос-3М» показано, что небольшие по массе доработки конструкции орбитальной ступени позволяют обеспечить тормозной импульс скорости около 66 м/с. Применительно к третьей ступени РН «Союз» такая доработка позволит создать тормозной импульс до 100 м/с, что значительно снизит время существования ступени на орбите с одновременным устранением возможности её взрыва на орбите.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате проведенного исследования имеющихся способов снижения техногенного воздействия на околоземное космическое пространство установлено, что главной причиной возникновения ККМ является взрыв остатков КРТ.

На приведенной ниже схеме показаны виды взрывов по способам образования.



Из схемы можно сказать, что главной причиной является тепловое нагружение элементов конструкции РН, что приводит, соответственно, к взрыву.

Предлагается использование двух наиболее реализуемых способов решения проблемы:

1. Необходимость в проведении пассивации КРТ путем введения в компоненты топлива каких-либо химических реагентов [2]. Исключение хотя бы одного компонента позволит существенно снизить вероятность взрыва отработанной ступени РН.

2. Выведение остатков КРТ через дренажные клапана.

Естественно, что каждый из способов имеет свои сложности в решении. Это и условия резкого перепада температуры конструкции (переход от активной работы в пассивное состояние), и изменение химических свойств материалов, и замерзание остатков в том числе.

В качестве примера можно привести РН «Зенит», где была применена система сброса остатков КРТ из баков второй ступени. На изделиях происходило замерзание дренажных клапанов и как следствие – взрыв. Проведя доработку удалось решить данную проблему.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При обсуждении результатов проведенного исследования установлено, что наилучшими способами решения данной проблемы являются способы газификации остатков КРТ, которые позволят:

а) произвести сброс остатков КРТ в виде газообразной смеси, которая не несет существенного влияния на околоземное космическое пространство и обеспечат взрывобезопасность;

б) используя остатки КРТ произвести управляемый маневр с орбиты элементов РН, выполнивших свою основную задачу.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Спуск КА с орбиты рассматривается как один из этапов утилизации ПКА на орбите.
2. Выделены базовые технологии, разрабатываемые за рубежом, в том числе использование различных типов двигательных установок для осуществления маневров в космическом пространстве и использование роботизированных манипуляторов, как основного элемента при захвате и последующем спуске ПКА с орбиты.
3. Рассмотрены технологии, разрабатываемые в России, в том числе в ОмГТУ.
4. Применение энергетического запаса остатков топлива в баках отработанных ступеней РН позволит существенно снизить затраты на маневры по управляемому спуску с орбит и траекторий выведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трушляков В. И., Шалай В. В., Шатров Я. Т. Снижение техногенного воздействия ракетных средств выведения на жидких токсичных компонентах ракетного топлива на окружающую среду: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2004. 220 с.

2. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC). Support to the IADC Space Debris Mitigation Guidelines. 2012-06-04. URL: <http://www.iadc-online.org> (дата обращения: 10.05.2016).
3. Организация Объединенных Наций, Руководящие принципы Комитета по использованию космического пространства в мирных целях по предупреждению образования космического мусора. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/space_debris.shtml (дата обращения: 14.05.2016).
4. Phipps C. R., Baker K. L., Libby S. B. [et al.]. Removing orbital debris with lasers // *Advances in Space Research*. 2012. Vol. 49, no. 9. P. 1283–1300. DOI: 10.1016/j.asr.2012.02.003
5. Nishida S., Kawamoto S. Strategy for capturing of a tumbling space debris // *Acta Astronautica*. 2011. Vol. 68, no. 1–2. P. 113–120. DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.06.045.
6. Трушляков В. И., Юткин Е. А. Обзор средств стыковки и захвата объектов крупногабаритного космического мусора // *Омский научный вестник*. 2013. № 2 (120). С. 56–61.
7. Cougnet C., Alary D., Gerber B., Utmann J., Wagner A. The Debritor: an "off the shelf" based multimission vehicle for large space debris removal // *Proc. of the 63rd International Astronautical Congress*, 1–5 October 2012, Naples, Italy. IAC-12-A6.7.7.
8. Трушляков В. И., Шатров Я. Т. Современные тенденции повышения экологической безопасности ракет космического назначения // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2012. Кн. 2. С. 168–171.
9. De Luca L. T., Bernelli F., Maggi F. Active space debris removal by a hybrid propulsion module // *Acta Astronautica*. 2013. Vol. 91. P. 20–33.
10. Clerc X., Retat I. Astrium vision on space debris removal // *Proceedings of 63rd International Astronautical Congress*. Naples, Italy, 2013.
11. Lee E., Jasper Z., Seubert Carl R., Schaub Hanspeter, Trushlyakov V., Yutkin E. Tethered tug for large low earth orbit debris removal // *Proceedings of AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conference*. Charleston, South Carolina, 2012.
12. Пат. 2521082 Российская Федерация, МПКВ64G 1/64. Способ стыковки космических аппаратов / Трушляков В. И., Юткин Е. А., Макаров Ю. Н., Олейников И. И., Шатров Я. Т. № 2012136164/11; заявл. 21.08.2012; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. 10 с.
13. Пат. 2531679 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/64. Способ очистки орбиты от космического мусора. Трушляков В. И., Макаров Ю. Н., Олейников И. И., Шатров Я. Т. № 2012136161; заявл. 28.08.2012; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 30.
14. Пат. 2490183 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/64, F 42 В 15/36. Стыковочное устройство КА / Трушляков В. И., Юткин Е. А., Тютеебаев Т. Т., Макаров Ю. Н., Шатров Я. Т. № 2012108867/11; заявл. 07.03.12; опубл. 20.08.13, Бюл. № 23.
15. Aslanov V., Yudin V. Dynamics of large space debris removal using tethered space tug // *Acta Astronautica*. 2013. Vol. 91. P. 149–156
16. Белоконов И. В., Крулов Г. Е., Трушляков В. И., Юдинцев В. В. Оценка возможности управляемого схода с орбиты верхней ступени РН «Союз» за счёт использования остатков топлива в баках // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета (национального исследовательского университета)*. 2010. № 2 (22). С. 105–111.
17. Колесников К. С. Кокушкин В. В., Борзых С. В., Панкова Н. В. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 376 с.

УДК 629.11:681.5

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. Л. Ахтулов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Рассмотрены вопросы построения и практического применения системы автоматизации проектирования элементов и агрегатов конструкций автоматических космических аппаратов с учетом их динамических характеристик. По результатам проведенных исследований предложен унифицированный метод автоматического формирования матриц жесткости и инерции сложной пространственной конструкции автоматического космического аппарата. Исходная информация разбивается на три группы параметров, характеризующих топологические, геометрические и механические свойства системы.

Методика, основанная на методе передаточных функций, позволяет определить уровень нагрузок определенного типа. После проведенных исследований следует отметить, что такой подход дает наиболее удовлетворительные результаты при решении проблем стендовых испытаний конструкций автоматических космических аппаратов и может быть использован для расчетов сложных механических систем машин и агрегатов различного назначения.

Ключевые слова: автоматический космический аппарат, система автоматизации проектирования.

I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка алгоритмов решения проектных задач [1] всего лишь звено в цепи проблем, решение которых позволит превратить ЭВМ в эффективный инструмент проектирования.

Автоматизация проектных работ связана с выполнением следующих требований [2]: методы должны соответствовать конструктивно-технологическим характеристикам объекта проектирования; входные и выходные параметры должны соответствовать действующей нормативно-технологической документации отрасли; должны учитываться возможности технической базы, обеспечивающей автоматизацию; методы должны быть удобны в эксплуатации.

Формулировка и выполнение эксплуатационных требований к подсистеме проектирования связаны с наибольшими трудностями. Это объясняется тем [3], что конструктор не всегда ясно представляет возможности автоматизации, а разработчики САПР недостаточно знакомы со спецификой работы конструктора. Такое положение приводит к нечеткому определению места конструктора в автоматизированном проектировании. Многообразие и сложность технических, математических и организационных задач часто заслоняют психологические и социальные аспекты внедрения автоматизированных методов.

Решение поставленных проблем возможно только при комплексном подходе, приводящем к разработке систем автоматизации проектирования (САПР), при создании которых основное внимание следует обратить на возможности автоматизации всех малопроизводительных рутинных операций, что приводит к минимизации всего цикла проектирования и чему удовлетворяют «интегрированные» САПР [4], которые должны:

- автоматизировать всю последовательность проектных операций с учетом возможностей проектировщика и ЭВМ;
- содержать набор альтернативных алгоритмов, обеспечивающих эффективное по быстродействию решение (при заданной точности) для различных конкретных задач;
- предусматривать возможность расширения и доработок системы;
- обеспечивать удобный обмен информацией, как внутренний (между блоками), так и внешний;
- иметь возможности постоянного контроля работы системы.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Автоматизированная подсистема геометрического размещения элементов в отсеке должна учитывать особенности задачи. Большой объем входной информации требует значительных затрат времени [5] на сбор, подготовку, загрузку и контроль данных. Несовершенство программ размещения, требующих большого времени счета и не учитывающих всех функциональных требований к размещению, приводит к большим затратам календарного времени на решение задачи. Этот недостаток может быть скомпенсирован введением активного диалога.

Результаты решения должны быть представлены не только в числовом виде, но и в виде чертежа, что обеспечит визуализацию восприятия информации и устранил непроизводительные затраты времени на оформление конструкторских документов.

Таким образом, автоматизация процесса проектирования должна включать элементы подготовки, записи, хранения, переработки и выдачи информации, а также обеспечивать ведение непрерывного контроля за ходом решения задачи и оперативное вмешательство конструктора в процесс решения.

В отечественной и зарубежной литературе основное внимание уделяется методам разработки систем автоматизации проектирования от разработки структуры к постепенной программной детализации – «сверху вниз» [6]. Эти методы, безусловно, являются перспективными и обладают рядом преимуществ, но требуют [7] устойчивой и развитой технической базы, квалифицированных разработчиков и проверенной детальной формализации задач проектирования. На этапе становления и развития САПР и компьютерной техники разработка таких систем приводит [3] к неоправданным потерям времени из-за многочисленных переделок, связанных с заменой вычислительной техники, введением новых вариантов операционных систем и новых внешних устройств, уточнением моделей проектирования.

Вместе с тем во многих проектно-конструкторских организациях имеется большой задел по решению отдельных проектных задач (в большинстве – расчетных [2]) с использованием разработанных пакетов приклад-

ных программ (ППП) [8]. Этот задел может быть с успехом использован при разработке подсистем автоматизированного проектирования в качестве составляющих блоков [9].

Таким образом, на начальном этапе создания САПР исторически и логически обоснованным является метод разработки систем «снизу вверх» [3, 6].

III. ТЕОРИЯ

Метод реализуется в следующем виде:

- поэтапное развитие по схеме программа – комплекс программ – подсистема;
- анализ эффективности, формирование требований и выработка задания на совершенствование программных средств на каждом этапе;
- разработка усовершенствованных программных средств с учетом развития вычислительной техники.

Такой подход требует длительного отрезка времени для создания подсистемы, но обладает рядом преимуществ [10]. Наиболее существенные из них – малая вероятность ошибок в постановке задачи и выборе модели, возможность подготовки квалифицированных кадров в процессе внедрения программных средств.

Таблица 1 иллюстрирует применение метода при создании подсистемы автоматизированного геометрического размещения элементов.

ТАБЛИЦА 1
ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Этап	Движущее противоречие	Цель	Средства достижения цели	Пути достижения цели
1	Качество компоновки – сжатые сроки проектирования.	Автоматизировать получение компоновки.	Внедрение ЭВМ, развитие программирования и методов оптимизации. Развитие методов решения задач размещения.	Разработка алгоритма и программы компонования. Снижение размерности задач благодаря выбору порядка размещения и предварительной ориентации элементов.
2	Ограниченность ресурсов ЭВМ – большое число пользователей. Относительный рост затрат на обработку информации – высокая потребная квалификация проектировщика.	Увеличить быстродействие программ компоновки. Снизить трудозатраты на контроль и документирование.	Внедрение внешних устройств ЭВМ (дисплеи, графопостроители), развитие алгоритмов машинной графики.	Разработка алгоритмов и программ контроля и ввода чертежа компоновки.
3	Затраты на автоматизацию	Повысить степень использования подсистемы в проектировании. Снизить затраты на разработку подсистемы.	Внедрение графических дисплеев, развитие стандартного математического обеспечения (операционные системы), развитие методов размещения и машинной графики. Опыт разработки пакета программ.	Расширение круга решаемых задач. Разработка альтернативных алгоритмов решения однотипных задач. Разработка программ ввода данных. Разработка стандартных модулей.

Изложенные в настоящем разделе алгоритмы методик динамического расчета реализованы в виде самостоятельных программ узкого назначения, каждая из которых может транслироваться, компилироваться и записываться на внешний носитель [9].

Программы составлены с использованием стандартного математического обеспечения и могут быть в зависимости от запросов заказчика реализованы в виде пакета прикладных программ с различной последовательностью их выполнения.

Построенные алгоритмы позволяют использовать для динамических расчетов ЭВМ и значительно их упрощают. Жесткостные, инерционные и демпфирующие свойства системы определяются из характеристик отдельных элементов, подсистем и подконструкций путем одинаковых автоматических операций матричной алгебры.

Входная информация включает топологические, геометрические и механические характеристики. Под топологической понимают информацию о взаимосвязи элементов системы, без конкретизации ориентации в пространстве и без определения их физических свойств.

Геометрические определяют относительные координаты точек соединения элементов, их углы Эйлера и размеры. Механические характеристики – физические свойства элементов: плотность материала, модули упругости, жесткости амортизаторов (демпфирование) и т.д. Таким образом, выходной информацией являются: записанные в виде двух числовых массивов матрицы жесткости и инерции системы.

Тогда основной задачей программной реализации является автоматическое формирование матриц жесткости и инерции конструкции сложной механической системы.

Наиболее трудоемкими операциями исследования колебаний сложных механических систем являются операции составления матриц жесткости, инерции и демпфирования. Использование ЭВМ позволяет применять в этих целях унифицированный метод автоматического формирования матриц жесткости и инерций пространственной конструкции сложной механической системы.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма программы формирования матриц жесткости и инерции для системы, элементами которой являются стержни, твердые тела и амортизаторы (демпферы).

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подпрограмма автоматического формирования динамической матрицы жесткости сложной механической системы. При исследовании свободных и вынужденных колебаний сложных механических систем, состоящих из твердых тел, упруго-инерционных стержневых элементов и амортизаторов, наиболее трудоемкие операции – составление матриц жесткости K , инерции M и демпфирования B . Отсюда важность задачи автоматического формирования динамической матрицы жесткости с помощью вычислительной техники, в частности компьютера.

В работе предложен унифицированный метод автоматического формирования матриц жесткости и инерции сложной пространственной конструкции. Исходная информация разбивается на три группы параметров, характеризующих топологические, геометрические и механические свойства системы.

Взаимосвязь элементов конструкции задается в предельно сжатой форме с помощью графа, который представляет совокупность пронумерованных узлов (вершин) [9].

В компьютере граф представлен в виде "топологических массивов" - вектора количества связей и вектора связей.

Вектор связей i -го узла $\vec{\sigma}_i = (S_1, S_2, \dots, S_{li})$ содержит номера узлов, связанных и i -узлом.

Вектор количества связей $\vec{V} = (l_1, l_2, \dots, l_n)$ составлен из n целых чисел l_i (n - число узлов), указывающих количество связей каждого узла.

Совокупность из n векторов σ_i компоуется в виде вектора связей: $[\Sigma] = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)^T$.

Преобразование матриц жесткости, инерции и демпфирования элементов конструкции из местной системы координат в общую проводят поочередно, так как такая операция однотипна [9].

Геометрия конструкции определяется ориентацией элементов углами ψ , ν , φ , последовательных поворотов вокруг осей x , y , z общей системы координат конструкции до их совпадения с местной системой координат элемента x' , y' , z' и относительными коэффициентами точек соединения с другими элементами r_x , r_y , r_z .

По заданным механическим характеристикам вычисляют матрицы жесткости, инерции и демпфирования элементов конструкции в местной системе координат, алгоритм описан в [9].

После просмотра всех узлов i , их связей i - j и вычислений полученные матрицы с использованием вектора \vec{V} и вектора связей $[\Sigma]$ размещаются и суммируются по требуемым адресам полных матриц жесткости, инерции и демпфирования всей системы. Размеры матриц K и M можно сократить методом кинематической регуляризации, сводящейся к удалению строк и столбцов, соответствующих устраняемым степеням свободы системы.

Программа автоматического формирования динамической матрицы жесткости включает:

1. Выбор i -го узла системы и определение и вектора \vec{V} числа его связей, а из вектора $[\Sigma]$ - номеров связываемых узлов $j = S_1, S_2, \dots, S_{li}$.
2. Ввод геометрических и механических характеристик i -го узла и связей i - j ;
3. Вычисление матриц жесткости, инерции и демпфирования в местной системе координат;

4. Определение матриц преобразования T и приведение их к общей системе координат;
5. Повторение процедур п.п. 1–4 для всех узлов $i=1, 2, \dots, n$.
6. Компоновка полных матриц жесткости K , инерции M и демпфирования B , их контрольная печать и запись на магнитную ленту.



Рис. 1. Блок-схема программы расчетов

Описанный метод формирования матриц относительно прост, легко реализуется на ПЭВМ и не требует большой оперативной памяти, позволяет варьировать параметрами элементов механической системы при оптимизации динамических характеристик конструкции.

Сформированные матрицы используются для расчета спектра собственных колебаний и исследования вынужденных колебаний конструкции.

Преобразование матрицы жесткости и инерции к общей системе координат для динамической модели показано в [9].

Исходными данными для расчета являются стержни рамы, твердые тела, амортизаторы.

Структура автоматизированной системы проектирования. Автоматизированная подсистема проектирования (АПП) представляет соединение технических, информационных и математических средств, с целью автоматизации отдельных операций процесса разработки и создания изделия.

Технические средства включают ЭВМ и набор внешних устройств. Для решения задач компоновки используются устройства ввода, хранения и вывода текстовой и графической информации [10]. Обработка информации осуществляется вычислительной машиной, включающей центральный процессор и периферийные ПЭВМ.

Математические средства представляют собой набор стандартных и специальных программ, обеспечивающих переработку информации и проведение проектных расчетов. Информационные средства предназначены для накопления, хранения и передачи данных. Центральной частью информационных средств является база данных, представляющая собой совокупность взаимосвязанных, хранящихся вместе данных [5].

Структурная самостоятельность и независимость от программ, использующих данные, позволяет расширять базу данных количественно (накопление данных) и качественно (наращивание возможностей за счет новых приложений).

Понятие ядра подсистемы включает ту минимальную программно-информационную часть АПП, без которой последняя перестает быть единым целым и превращается в набор программ (на первом этапе создания подсистема и ее ядро могут совпадать). Формирование ядра проводилось с учетом того, что АПП должна обладать следующими свойствами: адекватностью объекту и процессу проектирования; эргономичностью; надежностью; эффективностью.

Перечисленные заданные свойства позволяют наметить способы их обеспечения в рамках подсистемы, определяют функции составных частей АПП и ее состав (табл. 2).

Как видно из табл. 2, в состав ядра входят (рис. 2): база данных (с программами контроля загрузки и трансляции), решающие модули (включающие блоки формирования машинной модели, управления, проверки ограничений, поиска допустимого решения), вспомогательные модули (обеспечивающие подготовку информации для последующего проектирования), редуцирующие модули (позволяющие сократить время расчета), модули вывода информации (включающие блоки формирования изображений и документов).

ТАБЛИЦА 2

СОСТАВ И ФУНКЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Заданные свойства подсистемы	Способы реализации заданных свойств	Соответствующие модули АСП	Функции, выполняемые в рамках подсистемы
Адекватность объекту и процессу проектирования	1. Выбор проектных задач 2. Формализация функций цели и ограничений 3. Разработка машинной модели объекта 4. Выбор метода решения 5. Обработка результатов расчета	1. Решающие модули (блоки: формирования машинной модели, управления, проверки ограничений, поиска допустимого решения) 2. Вспомогательные модули	1. Получение результатов, приемлемых по форме и точности геометрических объектов, по учету ограничений, по оптимальности 2. Подготовка информации для последующего проектирования
Эргономичность	6. Разработка входной и выходной модели 7. Разработка методов информационного обмена 8. Автоматизация операций ввода и вывода информации	3. База данных (совместно с управляющими блоками и трансляторами). 4. Модули вывода информации (совместно с блоками формирования изображений и документов)	3. Хранение информации 4. Удобный информационный обмен (включая документирование и диалог)
Надежность	9. Контроль данных 10. Испытание программ 11. Введение альтернативных алгоритмов и программ		
Эффективность	12. Сокращение машинного времени расчета	8. Редуцирующие модули	7. Снижение размерности задач



Рис. 2. Программно-информационное обеспечение подсистемы автоматизированного компонования

Основные принципы построения АПП, сформулированные в работе [6], учтены при создании подсистемы автоматизации компоновочных работ следующим образом: подсистема рассматривается как составная часть общей системы проектирования; структура подсистемы позволяет осуществлять поэтапное создание АПП с последовательным расширением класса решаемых задач и дорабатывать АПП с учетом развития технической базы или изменения характера проектных задач; унифицируются

входная информация, выходные документы и элементы программного обеспечения; осуществляется рациональное распределение функций человека и ЭВМ в рамках подсистемы; автоматизируется сбор, обработка и накопление информации о ходе проектирования от изделия к изделию, что допускает многократное использование информации и обучение.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Детальная структуризация подсистемы позволяет сделать ее открытой. В частности, программное обеспечение построено в виде набора иерархически упорядоченных модулей. Такая структура позволяет производить введение новых и замену старых модулей без доработок системы в целом.

Вопросы повышения надежности подсистем. Надежность АПП зависит от надежности технических средств и надежности программ. Что вполне укладывается в рамки стандартных определений (несмотря на некоторые отличия в трактовке таких фундаментальных понятий, как отказ, сбой, восстановление и др.), а для ее оценки могут быть применены методы теории надежности.

При создании подсистем автоматизированного проектирования вопросы надежности программного обеспечения приобретают особо важное значение. Это объясняется следующими причинами:

во-первых, включение АПП в цикл проектирования требует получения результатов, не снижающих надежность проектируемого изделия;

во-вторых, введение дополнительных операций обработки информации приводит к возникновению ошибок, обнаружение и исправление которых требует больших затрат времени;

в-третьих, низкая надежность работы технических средств и невысокий уровень организации работ усугубляют временные потери, что в условиях дефицита времени приводит к появлению ошибок.

Для увеличения надежности АПП геометрического размещения элементов применены три направления: контроль входной и промежуточной информации; испытание программных модулей и АПП в целом; параллельное использование альтернативных программных модулей, одинаковых по входам и выходам.

Использование альтернативных программных модулей

Результат размещения геометрических тел во многом зависит от способа решения задачи. В некоторых случаях один и тот же порядок размещения тел обеспечивает получение решения одним способом, в то время как применение другого способа не дает решения в области допустимых размещений. Эта особенность задачи может быть использована для повышения надежности системы.

В том случае, когда один из программных модулей не обеспечивает получения решения (невозможность отыскания размещения в области допустимых решений, выявление ошибки в программе и т.п.), переключение на альтернативный программный модуль может привести к приемлемому результату. Возможности дублирования программных модулей иллюстрируются схемой (рис. 3).

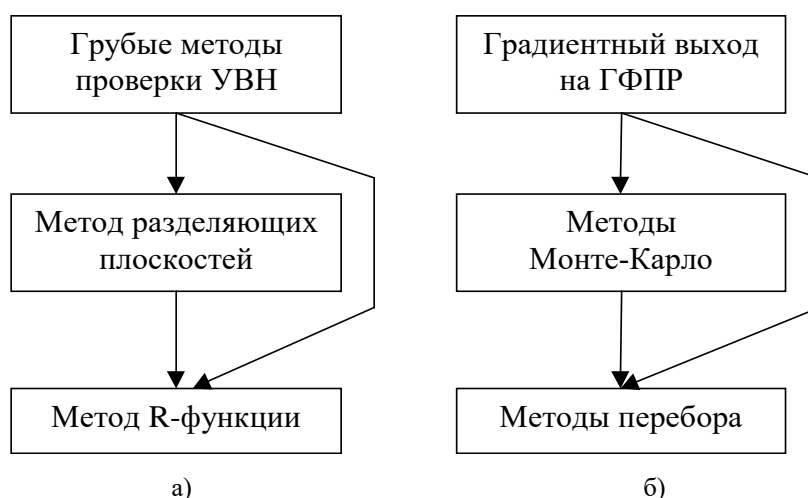


Рис. 3. Схема дублирования программных модулей:
 а – методы проверки угла вертикальной наводки (УВН);
 б – методы поиска размещения
 (ГФПР – годограф вектор-функции плотного размещения)

Вывод информации. Получение конструкторской документации (чертежей и тестовых документов) с применением ЭВМ не только удобно для конструктора, но и значительно сокращает сроки проектирования. Исполнение графических документов составляет до 30% трудоемкости конструкторских работ, а производительность чертежных автоматов в 400 раз превышает производительность чертежника [5].

В автоматизированном проектировании выходную информацию целесообразно представлять в виде, не требующем дополнительной обработки и соответствующем ЕСКД, хотя это и требует значительных дополнительных усилий на разработку соответствующего программного обеспечения.

Компоновочный чертеж обладает большой плотностью и наглядностью представления информации, но не дает полного количественного описания отсека. Данные о размерах элементов, координатах и установки, основные характеристики агрегата необходимо выдавать в виде таблиц с соответствующими комментариями.

Вывод графической информации. Математическое обеспечение для получения графических документов должно содержать программы: выбора видов, сечений, размеров; построения двумерного изображения; удаления невидимых линий; построения размерных линий и надписей; сокращения холостых проходов; вычерчивания.

Задача выбора видов заключается в отображении взаимного положения и относительных размеров каждого элемента компоновки при минимальном количестве избыточной информации.

Простейший алгоритм выбора видов для вычерчивания компоновки агрегата с прямоугольными параллелепипедами заключается в следующем:

конструктор выбирает два основных вида отсека;

для каждого вида составляется список элементов в порядке возрастания координат размещения по оси, перпендикулярной плоскости проекции;

из списка удаляются элементы, видимые на основном виде; видимым считается прибор, два ребра которого не закрываются другими элементами;

координаты первого из оставшихся приборов списка и определяют плоскость сечения отсека;

список приборов корректируется, и процесс повторяется до тех пор, пока не будут получены параметры плоскостей сечения, полностью раскрывающие внешний вид компоновки. Схема алгоритма приведена на рис. 4.

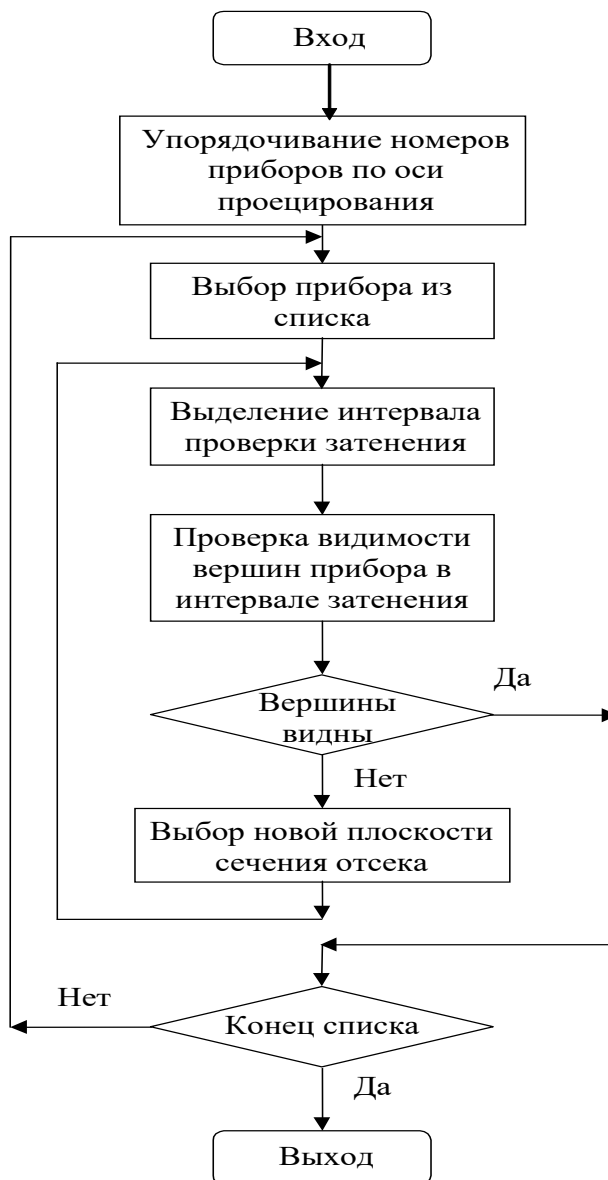


Рис. 4. Схема алгоритма выбора видов отсека

Построение двумерного изображения сводится к проецированию ребер приборов и образующих оболочки на соответствующую координатную плоскость [4]. Выходными параметрами программы построения чертежа являются кортежи координат вершин и признаков вычерчивания ломаной линии, образующей чертеж.

Для удаления невидимых линий в чертеже компоновки, образованной произвольно ориентированными прямоугольными параллелепипедами, использован следующий алгоритм:

составляются списки вершин, образующих на плоскости ломаные линии, ограничивающие проекции граней параллелепипедов;

проверяется пересечение ребер для каждой пары проекций граней; для пересекающихся ребер определяются координаты точек пересечения (на плоскости);

видимость отрезков ребер определяется положением вершин одной грани относительно плоскости другой;

списки вершин, образующих ломаные линии, дополняются точками пересечения ребер в соответствии с условиями видимости; невидимые вершины исключаются из списков.

Таким образом, выходная информация алгоритма представляет собой списки координат вершин, образующих видимые линии компоновки.

Программы построения размерных линий и надписей используют стандартные блоки библиотеки ГРАФОР [3, 11].

Основная сложность при построении таких программ заключается в размещении надписей и размерных линий на свободном поле чертежа.

Распределение функции в системе человек–ЭВМ. Рациональное распределение функций конструктора и ЭВМ требует учета возможностей современной техники.

Так, ЭВМ, осуществляющая расчетные операции в сотни тысяч раз быстрее человека, не может сравниться с ним в скорости обработки графической информации. Это вызывает необходимость активного включения конструктора в процесс автоматизированного решения задач геометрического проектирования [5, 10]. Возможность активного диалога обусловлена наличием графических дисплеев и соответствующего программного обеспечения. Распределение операций между конструктором и ЭВМ при решении компоновочных задач приведено в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ

Конструктор	ЭВМ
Загрузка и контроль данных. Составление задания. Загрузка и контроль задания. Анализ предварительных результатов, изменение задания, выбор алгоритма решения. Запуск программы расчета, контроль и оперативное изменение задания. Детальный анализ окончательного результата, принятие решения.	Загрузка данных. Выдача контрольной информации. Запись и хранение данных. Загрузка, выдача контрольной информации, запись. Получение и выдача результатов предварительной обработки информации о размещении элементов. Выдача промежуточных результатов в виде текста или чертежа по команде конструктора. Выдача окончательного результата.

Подсистема предусматривает выдачу текстовой и графической информации как в процессе решения задачи (в виде, удобном для оперативного принятия решения), так и по окончании решения (в виде стандартных документов).

Ввод данных в формализованном виде, близком к естественному языку инженера, также как и вывод результата в виде чертежа, удобен для конструктора и избавляет его от дополнительных преобразований информации.

Диалоговый обмен в процессе непосредственного решения задачи на ЭВМ оказался не только полезным, но в ряде случаев и необходимым для успешного завершения вычислений. Это объясняется следующим образом. Быстродействие поискового алгоритма оценивается числом итераций. При переборе координат размещения, имеющих равную вероятность попадания. При значениях отношения, близких к единице, число итераций возрастает настолько, что решение не может быть получено за приемлемое время счета. В плотных компоновках такие ситуации наступают 2...3 раза даже при размещении приборов в порядке убывания размеров. В этих случаях вмешательство конструктора в ход решения задачи позволяет намного ускорить ход решения.

VI. Выводы и заключение

Методика, основанная на методе передаточных функций, позволяет определить уровень нагрузок, воздействующих на конструкцию.

После проведенных исследований следует отметить, что такой подход дает наиболее удовлетворительные результаты при решении проблемы стендовых испытаний конструкций автоматических космических аппаратов и может быть использован для расчетов сложных механических систем машин и агрегатов различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половинкин, А. И. [и др.]. Автоматизация поискового конструирования: искусственный интеллект в машинном проектировании / под ред. А. И. Половинкина. М.: Радио и связь, 1981. 344 с.
2. Ахтулов А. Л., Леонова А. В., Ахтулова Л. Н. Методика оценки качества процессов проектирования сложных технических устройств // Омский научный вестник. 2013. № 3 (123). С. 87–91.

3. Дятлов М. Н., Юдкин И. Ю., Шляховский А. А. Тенденции развития современных интегрированных систем проектирования // Молодой ученый. 2015. № 2. С. 148–150.
4. Полозов В. С. [и др.]. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи. М.: Машиностроение, 1983. 280 с.
5. Martin James. Computer Data-Base Organization. Second Edition // Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1977. 662 p. = Дж. Мартин. Организация баз данных в вычислительных системах / пер. с англ.; под ред. А.А. Стогния и А.Л. Щёрса. М.: Мир, 1989. 662 с.
6. Nakala M. K. Current trends in vibration calculation methods // Seminar on Ship vibration, 24-th ESPOO. 1982. Vol. 24. P. 115–134.
7. Мишин В. П., Осин М. И. Введение в машинное проектирование летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 126 с.
8. Космодемьянский Е. В. Особенности процесса создания трехмерной модели конструкции космического аппарата дистанционного зондирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. № 1/2. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-protsesta-sozdaniya-trehmernoj-modeli-konstruktsii-kosmicheskogo-apparata-distantsionnogo-zondirovaniya> (дата обращения: 26.08.2016).
9. Ахтулов А. Л., Ахтулова Л. Н. Расчет колебаний конструкции автоматического космического аппарата методом подконструкций // Динамика систем, механизмов и машин. 2012. Кн. 2. С. 112–115.
10. Зозулевич Д. М. Машинная графика в автоматизированном проектировании. М.: Машиностроение, 1976. 240 с.
11. Тарасов Е. В., Балык В. М. Методы проектирования летательных аппаратов. М.: Вузовская книга, 2011. 322 с.

УДК 629.764

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДУГОВОГО ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. Н. Блинов, И. С. Вавилов, В. В. Косицын, А. И. Лукьянчик, В. И. Рубан,
В. В. Шалай, П. С. Ячменев, Ю. М. Миронов¹

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия*

Аннотация – на основе проведенных исследований по маневрирующим малым космическим аппаратам (МКА) с аммиачными корректирующими двигательными установками (КДУ) с электротермическими микродвигателями (ЭТМД) рассмотрено направление решения актуальной задачи дальнейшего совершенствования МКА с КДУ путем создания электродуговых ЭТМД с низким энергопотреблением (до 70 Вт) и высоким удельным импульсом тяги (до 350 с).

Целью исследований является подтверждение технической возможности создания электродугового ЭТМД для МКА с энергопотреблением 60...70 Вт и удельным импульсом тяги 300...350 с

В ходе исследований решены задачи по определению конструктивного облика демонстрационного образца № 2 электродугового ЭТМД, исследованию его температурных характеристик, определяющих величину удельного импульса тяги, исследованию эрозионной стойкости материала катода ЭТМД при воздействии электрической дуги.

Разработана конструктивная схема электродугового ЭТМД с визуализацией электрической дуги, изготовлены демонстрационные образцы ЭТМД и проведены экспериментальные исследования ЭТМД при работе на азоте, аргоне. При энергопотреблении 68 Вт достигнута температура рабочего тела в сопле ЭТМД за критическим сечением в 1400 К, что позволяет прогнозировать величину удельного импульса тяги ЭТМД при работе на аммиаке в 300...350 с.

На основании экспериментальных исследований эрозионной стойкости материала катода ЭТМД (вольфрам) при воздействии электрической дуги показана необходимость дальнейших исследований для обоснования технической возможности создания электродугового ЭТМД в составе КДУ МКА с требуемым ресурсом работы.

Экспериментальные исследования являются продолжением работ в области создания ЭТМД различной конструкции и представляют практический интерес при создании КДУ для маневрирующих МКА.

Ключевые слова: корректирующая двигательная установка, маневрирующий малый космический аппарат, удельный импульс тяги, электродуговой электротермический микродвигатель.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный этап освоения космического пространства характеризуется широкомасштабным созданием и применением МКА массой до 400 кг для решения научных и прикладных задач, запускаемых групповым и попутным способами с использованием ракетных средств выведения.

В настоящее время актуальность создания маневрирующих спутниковых платформ с КДУ приобретает все большую значимость, поскольку современные МКА создаются для решения широкого круга задач, включая задачи орбитального маневрирования.

В процессе функционирования МКА типовыми задачами орбитального маневрирования являются: ликвидация ошибок выведения МКА ракетными средствами выведения, поддержание орбитальных параметров, межорбитальное маневрирование, построение орбитальных группировок МКА, увод МКА на орбиту утилизации. Существует и ряд специфических задач прикладного и научного значения: инспектирование других МКА и орбитальных объектов, наблюдение за околоземным космическим пространством, увод космических объектов на орбиту захоронения и др. [1].

Для решения возникающих задач орбитального маневрирования МКА в их состав вводятся КДУ с электрическими микродвигателями различной конструкции, включая аммиачные ЭТМД. Создание маневрирующих МКА связано с актуальной задачей создания новых аммиачных ЭТМД с низким энергопотреблением и высоким уровнем удельного импульса тяги, адаптированных в состав МКА [2–4].

Созданные аммиачные ЭТМД с проволочными нагревательными элементами с тягой 30 мН характеризуются ценой тяги до 2 Вт/мН и использованы в составе ряда МКА массой 30...120 кг. Удельный импульс тяги таких ЭТМД при энергопотреблении 60 Вт не превышает 250 с (рис. 1) [5–7].

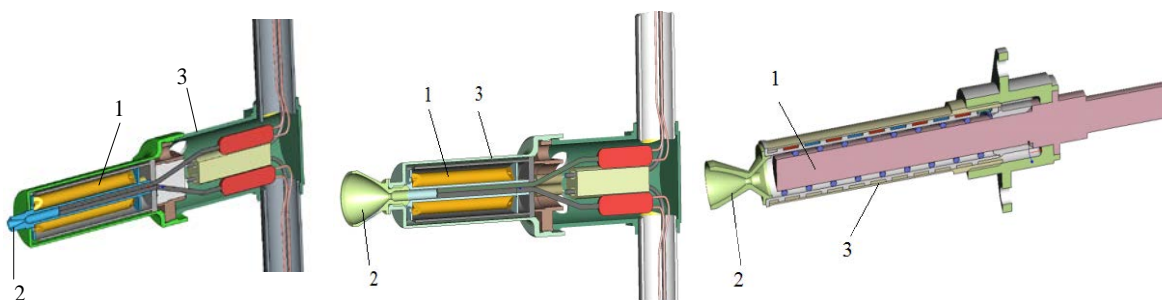


Рис. 1. ЭТМД с проволочными нагревательными элементами:
1 – нагревательный элемент; 2 – реактивное сопло; 3 – корпус

Повышение удельного импульса тяги до 300 с приводит к существенному увеличению энергопотребления (до 300 Вт и более) всей КДУ, что для МКА в диапазоне масс до 120 кг приводит к увеличению площади солнечной батареи и соответственно массы, что является большим недостатком.

Созданные ЭТМД могут использовать в качестве рабочего тела сжатый азот, обладающий экологической безопасностью. Рабочее тело на основе азота используется в практике наземной экспериментальной отработки аммиачных ЭТМД, а также в некоторых летных КДУ. Так, фирмой SSTL (Великобритания) для МКА «UoSAT 12» создан ЭТМД типа «Resistojet» с рабочим телом окись азота.

В ЭТМД типа «Resistojet» окись азота испаряется с помощью электронагревательного элемента, получающим электропитание от батарей МКА. При удельном импульсе тяге 127 с, тяге 93 мН (9.5 гс) и энергопотреблении 90 Вт ЭТМД обеспечивает суммарное приращение скорости МКА «UoSAT 12» в 10.4 м/с.

В МКА «Orbcomm» используются два газореактивных микродвигателя, работающих на сжатом азоте.

Отличительной особенностью МКА является жесткое ограничение энергопотребления бортовой аппаратуры в целом и КДУ в частности. На аппаратах такого класса, как правило, не удается разместить солнечные батареи большой мощности, так как с ростом мощности батарей неизбежно растут их масса, размеры и момент инерции [8].

Например, оценка массовых характеристик солнечных батарей из фрезерованных панелей проводится в соответствии с удельными характеристиками аналогов:

- стационарные солнечные батареи, удельная масса – 4.93 кг/м²;
- поворотные солнечные батареи, удельная масса с приводами, замками – 7.85 кг/м²;
- односторонние поворотные солнечные батареи, удельная масса с приводами, замками – 7.16 кг/м².

Кроме того, для всех МКА характерно отсутствие системы ориентации солнечных батарей, что снижает эффективность фотоэлектрических преобразователей. Поэтому в качестве КДУ на МКА должны применяться установки с небольшой ценой тяги – порядка 40 Вт/г и менее, а суммарное энергопотребление КДУ должно составлять не более 100 Вт.

Проведенные исследования по ЭТМД позволили сформулировать актуальную задачу дальнейшего совершенствования маневрирующих МКА с КДУ на основе создания КДУ на аммиаке с электродуговым ЭТМД с низким энергопотреблением (до 70 Вт) и высоким удельным импульсом тяги (300...350 с).

В электродуговом ЭТМД:

- электрическая дуга малой мощности создается между установленными в камере микродвигателя электродами: анодом и катодом;
- один из электродов, анод, расположен в области сопла;
- второй электрод, катод, находится по центру канала подачи рабочего тела;
- охлаждение катода осуществляется за счет прохода газа через «завихритель» и отвода тепла с катода струей закрученного газа.

Характеристики и общий вид некоторых известных электродуговых ЭТМД приведены в табл. 1 и рис. 2, 3 [9].

ТАБЛИЦА 1
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ЭТМД

Название ЭТМД	Фирма (страна) изготовитель	Рабочее тело	Характеристики				
			Мощность, Вт	Тяга, мН	Удельный импульс тяги, с	КПД, %	Цена тяги, мН/кВт
Mini LPATS	LeRC	sNH ₃	250	30	470	28	120
			250	51	360	36	205
Sagami-III	ISAS	sN ₂ H ₄	300	47	480	34	155
VELARC	IRS	Ar	100	27,5	170	22,5	275
VELARC	IRS	NH ₃	375	27,5	520	18,5	75
			240	35	350	25	145
VELARC	IRS	H ₂	365	22,5	865	26	60
			310	14	820	18	45

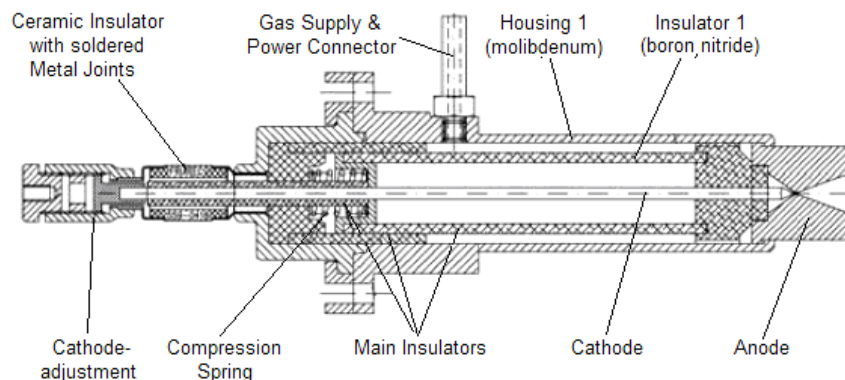


Рис. 2. Дуговой двигатель Dagmar Vock: потребляемая мощность – (0,5–2,0) кВт, рабочее тело – водород, массовый расход – 15 мг/с

При разработке электродуговых ЭТМД основной проблемой является обеспечение работоспособности электродов, поскольку мощное тепловыделение в зоне контакта электрода с дугой приводит к уносу материала электрода в результате эрозии.

Для ослабления местного воздействия дуги организуют её вращение, чтобы пятно контакта перемещалось по большей поверхности электрода. Вращение дуги достигается путём гидродинамического воздействия за счёт направленного потока рабочего тела.

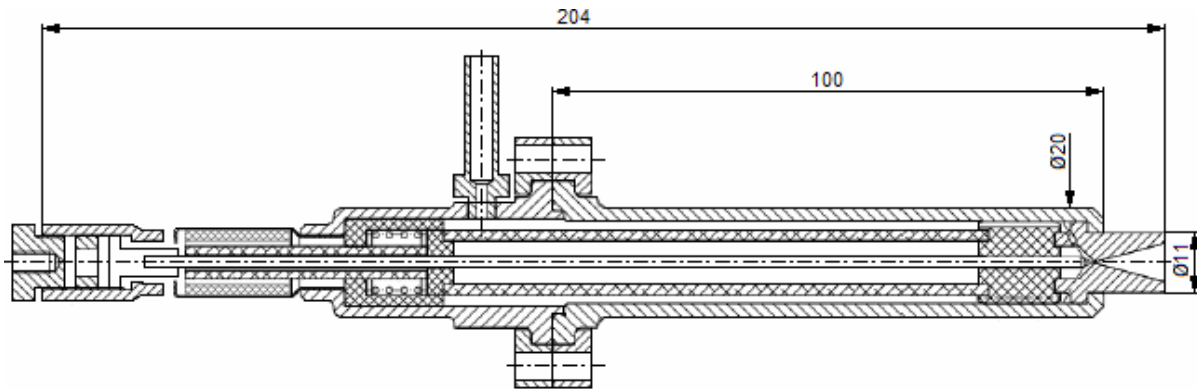


Рис. 3. Дуговой двигатель VELARC

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В основе принятой методологии создания электродугового ЭТМД для МКА заложена экспериментальная отработка новых технических решений в условиях, отвечающим требованиям экологической безопасности. Поэтому в качестве модельного рабочего тела ЭТМД выбран сжатый азот и аргон.

В этой связи практический интерес в целях создания КДУ для маневрирующих МКА составляют следующие экспериментальные исследования:

- работоспособности ЭТМД при работе на азоте (аргоне) с визуализацией электрической дуги;
- температуры нагрева рабочего тела на входе в критическое сечение сопла конструкции ЭТМД при энергопотреблении 68 Вт;
- изменения геометрии катода в процессе функционирования ЭТМД.

III. ТЕОРИЯ

Взаимодействие массовых характеристик МКА, тяги, удельного импульса тяги, времени функционирования и количества включений ЭТМД (КДУ) представим в виде выражения:

$$V = -g_0 \cdot P_{уд}^B \ln \left(\frac{m_{МКА} - \frac{P_{ЭТМД}}{P_{уд}^P} T^P (N-1) - \frac{P_{ЭТМД}}{P_{уд}^B} T^B N}{m_{МКА} - \frac{P_{ЭТМД}}{P_{уд}^P} T^P \cdot (N-1)} \right) - g_0 P_{уд}^P \ln \left(\frac{m_{МКА} - \frac{P_{ЭТМД}}{P_{уд}^B} T^B N - \frac{P_{ЭТМД}}{P_{уд}^P} T^P N}{m_{МКА} - \frac{P_{ЭТМД}}{P_{уд}^B} T^B \cdot N} \right) \quad (1)$$

где, V – характеристическая скорость, реализуемая КДУ в составе МКА; $P_{уд}^P$ – средний удельный импульс тяги ЭТМД при выходе на режим; $P_{уд}^B$ – средний удельный импульс тяги ЭТМД после выхода на режим;

$m_{МКА}$ – стартовая масса МКА; $P_{ЭТМД}$ – тяга ЭТМД; T^B – время выхода ЭТМД на режим; T^P – время работы ЭТМД на режиме; N – количество включений ЭТМД (КДУ).

В соответствии с (1) получена зависимость массы топлива m_t и количества включений $N \times 10^{-1}$ КДУ от запасов характеристической скорости V для МКА массой 160 кг с ЭТМД с проволочным нагревателем и электродуговым ЭТМД (рис. 4).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже наличие у электродугового ЭТМД удельного импульса тяги в 300 с после выхода на режим позволяет сократить требуемые запасы топлива КДУ на (34...37)%. При этом при $P_{ЭТМД}=30$ мН требуемые ресурсные характеристики (как количество включений КДУ длительностью 1200 с) для обоих ЭТМД практически не изменяются.

Работа электродугового ЭТМД сопряжена с эрозией электродов, химическими превращениями и другими процессами разрушения электродов. Скорость данных процессов непосредственно сказывается на продолжительности работы ЭТМД.

В этой связи основными задачами экспериментальных исследований являются:

- подтверждение работоспособности ЭТМД путем визуализации электрической дуги;

- определение температуры нагрева конструкции ЭТМД и рабочего тела на входе в критическое сечение сопла при энергопотреблении 60 Вт;
- исследования изменения геометрии катода.

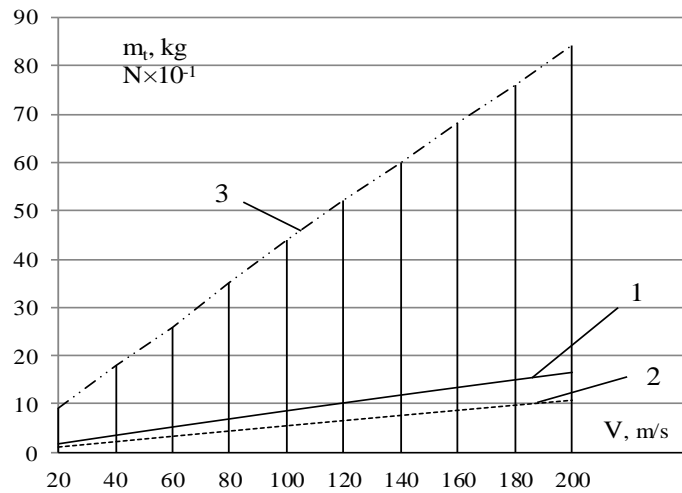


Рис. 4. Зависимость массы топлива m_t и количества включений $N \times 10^{-1}$ КДУ от запаса характеристической скорости V для МКА массой 160 кг:

- 1 – ЭТМД с проволочным нагревателем: $P_{уд}^B / P_{уд}^P = 158/200$; $T^B = 420$ с; $T^P = 780$ с; $P_{ЭТМД} = 30$ мН;
- 2 – электродуговой ЭТМД: $P_{уд}^B / P_{уд}^P = 200/300$; $T^B = 80$ с; $T^P = 1120$ с; $P_{ЭТМД} = 30$ мН; 3 – $N \times 10^{-1}$:
 для ЭТМД с проволочным нагревателем и электродугового

Трудности измерения температуры на входе в критическое сечение сопла ЭТМД привели к схеме измерения температуры в реактивном сопле в районе критического сечения при помощи игольчатой термопары. При этом необходимо иметь в виду, что, перемещаясь по соплу, газ расширяется, его температура и давление падают, а скорость возрастает. Поэтому измеренная температура рабочего тела будет ниже температуры на входе в критическое сечение сопла.

В этой связи по замеренной температуре газа в критическом сечении сопла определялась прогнозная температура на входе в критическое сечение сопла по формуле (при относительной температуре в рассматриваемом критическом сечении $\lambda_c = 1$):

$$T_K = T_{кр} \cdot \frac{k+1}{2}, \quad (2)$$

где T_K – температура газа в камере ЭТМД; $T_{кр}$ – замеренная температура газа в критическом сечении сопла ЭТМД; k – показатель ударной адиабаты газа.

Особенность применения аммиака заключается в том, что в камере ЭТМД при повышении температуры:

- значительно изменяются теплофизические характеристики газа: теплоемкость и ударная адиабата;
- выше 450 °С в камере двигателя происходит частичная диссоциация аммиака;
- при температуре выше 1040 °С весь аммиак практически мгновенно, за десятки микросекунд, разлагается в смесь азота и водорода.

Значение показателя ударной адиабаты аммиака при низкой температуре составляет $k=1,32$, при повышении температуры до 250...300 °С становится ниже: $k=1,2$, а при температуре выше 1000 °С из-за полного разложения аммиака на азот и водород увеличивается и достигает $k=1,34$.

При нормальных условиях молярная масса аммиака составляет $M_r=17$ г/моль, при повышении температуры за счет разложения аммиака средняя молярная масса снижается и при полном разложении аммиака становится равной $M_r=8,5$ г/моль.

С учетом этого и с использованием выраженных через газодинамические функции зависимостей параметров газового потока в ЭТМД от температуры, характерных размеров сопла проведен расчет удельного импульса тяги электродугового ЭТМД с рабочим телом – аммиаком, азотом и аргоном (рис. 5).

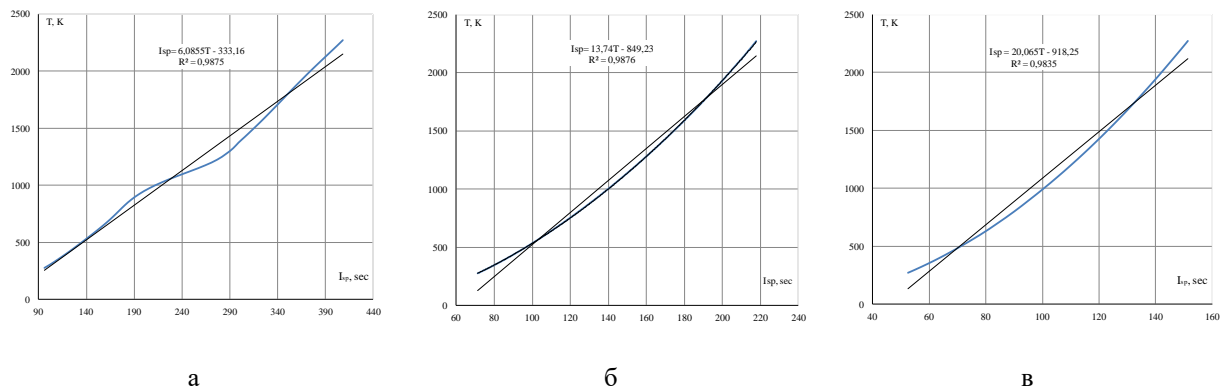


Рис. 5. Расчетные значения удельного импульса тяги ЭТМД при использовании аммиака (а), азота (б) и аргона (в) в зависимости от температуры на входе в критическое сечение сопла

Расчеты проведены для ЭТМД, аналогичного экспериментальному: коническое сопло с углом полураствора 20° , диаметр критического сечения сопла 1 мм, диаметр среза сопла – 4 мм.

Из приведенных данных следует, что достижение удельного импульса тяги $P_{уд}=(300\dots350)$ с при работе на аммиаке возможно при температуре на входе в критическое сечение сопла (1450...1850) К. При этой же температуре электродугового ЭТМД на азоте будет иметь удельный импульс тяги $P_{уд} \leq 195$ с.

Экспериментальное исследование износостойкости катода электродугового ЭТМД после функционирования заключались в оценке изменения геометрии катода – данный параметр определялся с помощью конфокальной микроскопии с построением объёмных изображений.

Для проведения предварительных экспериментальных исследований был создан демонстрационный образец № 1 электродугового ЭТМД, обеспечивающий визуализацию горения дуги и её перемещение по кромке отверстия анода (рис. 6). В качестве материала катода выбран вольфрам, анода – медь.

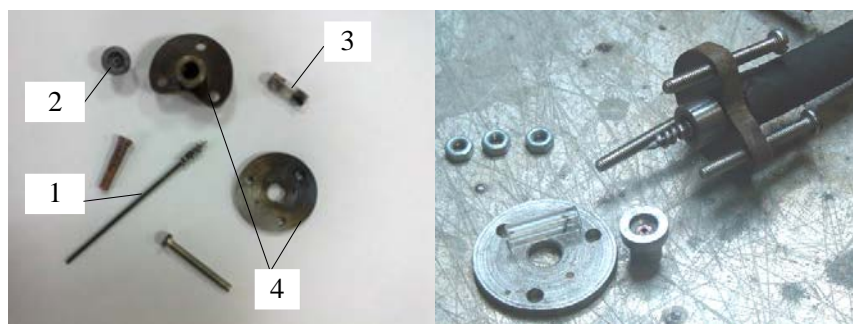


Рис. 6. Конструкция демонстрационного образца № 1 электродугового ЭТМД:
1 – катод с завихрителем газа; 2 – анод в корпусе; 3 – трубка визуализации дуги;
4 – конструктивные корпусные элементы

Для дальнейших экспериментальных исследований был создан демонстрационный образец № 2 электродугового ЭТМД, также обеспечивающий визуализацию горения дуги и её перемещение по кромке отверстия анода (рис. 7). В качестве материала катода и анода выбран вольфрам.

Демонстрационный образец № 1 электродугового ЭТМД представляет собой упрощенный вариант электродугового микродвигателя, в котором канал подачи газа выполнен из прозрачной кварцевой трубки для визуального наблюдения за дуговым разрядом.

Демонстрационный образец № 2 электродугового ЭТМД представляет собой упрощенный вариант электродугового микродвигателя, в котором канал подачи газа выполнен из прозрачной кварцевой трубки и во внешнем корпусе выполнены смотровые окна для визуального наблюдения за дуговым разрядом.

Охлаждение катода и анода в ЭТМД осуществляется следующим образом.

Мгновенный столб дуги горит между острием катода и анодным пятном. За счет закручивания завихрителем струи газа мгновенный столб дуги совершает кольцевое перемещение по внутренней кромке соплового отверстия анода.

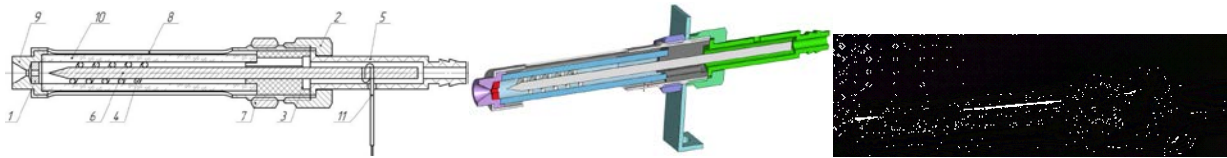


Рис. 7. Конструкция демонстрационного образца № 2 электродугового ЭТМД:
 1 – сопловая вставка (анод); 2 – гайка накидная; 3 – держатель катода; 4 – завихритель; 5 – кожух;
 6 – катод; 7 – контргайка; 8 – кожух; 9 – сопло; 10 – кварцевая трубка; 11 – токоподвод

Принципиальная схема демонстрационного образца № 2 электродугового ЭТМД приведена на рис. 8.

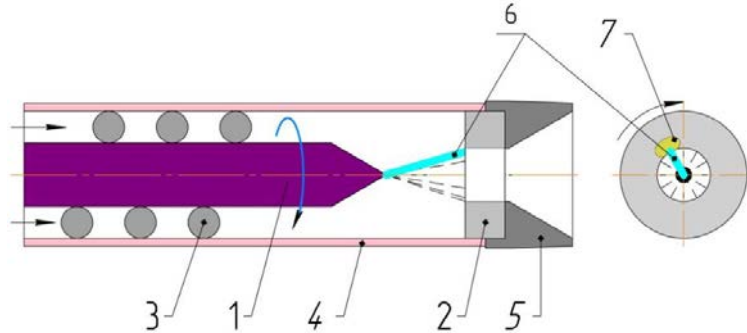


Рис. 8. Принципиальная схема демонстрационного образца № 2 ЭТМД:
 1 – катод из вольфрама с добавлением тория; 2 – анод; 3 – завихритель; 4 – корпус;
 5 – сопло; 6 – мгновенная дуга; 7 – анодное пятно

Происходит интенсивный местный нагрев анода в области текущего мгновенного положения анодного пятна. Поток газа частично нагревается в столбе дуги, часть газа проходит вне столба дуги, охлаждает анод вне анодного пятна, а сам газ нагревается.

За счет совместного истечения через сопло двух частей газа: раскаленных в столбе дуги и подогретых за счет охлаждения катода и анода, одновременно решаются две задачи – обеспечение длительного непрерывного функционирования микродвигателя и эффективного нагрева газа на входе в сопло.

Такая схема проигрывает в достижении более высоких удельных характеристик по сравнению с прямым нагревом всего истекающего газа столбом электрической дуги, но позволяет отказаться от введения дополнительной системы охлаждения электродов микродвигателя.

Экспериментальным образцом для исследования износостойкости являлся катод (материал: вольфрам) с формой в виде стержня с конусом (рис. 9).

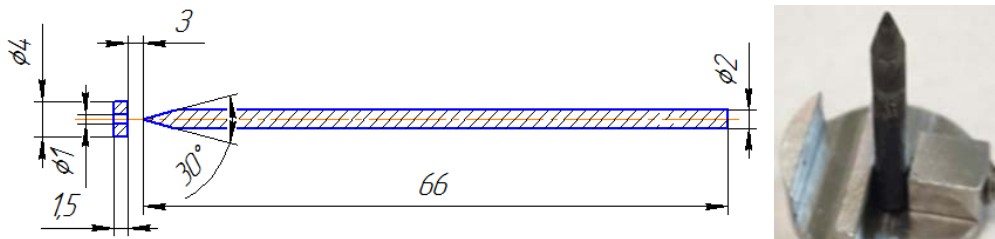


Рис. 9. Схема электродов и образец катода ЭТМД

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ходе исследований решены задачи по определению конструктивного облика демонстрационного образца № 2 электродугового ЭТМД, исследованию его температурных характеристик, определяющих величину удельного импульса тяги, исследованию эрозионной стойкости материала катода ЭТМД при воздействии электрической дуги.

Разработана конструктивная схема электродугового ЭТМД с визуализацией электрической дуги, изготовлены демонстрационные образцы ЭТМД и проведены экспериментальные исследования ЭТМД при работе на азоте, аргоне. При энергопотреблении 68 Вт достигнута температура рабочего тела в сопле ЭТМД за критическим

сечением в 1400 К, что позволяет прогнозировать величину удельного импульса тяги ЭТМД при работе на аммиаке в 300...350 с.

Результаты экспериментов представлены в виде:

- визуализации горения дуги в демонстрационных образцах № 1,2 электродугового ЭТМД при работе на аргоне и азоте;
- графиков изменения температуры газа в сопле ЭТМД в районе критического сечения и конструкции ЭТМД в районе сопла при работе на азоте и аргоне;
- визуализации изменения геометрического профиля катода методом конфокальной микроскопии.

При функционировании демонстрационного образца № 1 на аргоне наблюдалось устойчивое горение дуги (рис. 10).



Рис. 10. Визуализация функционирования демонстрационного образца № 1 ЭТМД на аргоне

При функционировании демонстрационного образца № 2 на аргоне и азоте также обеспечивалось устойчивое горение дуги (рис. 11).



Рис. 11. Визуализация функционирования демонстрационного образца № 2 ЭТМД на аргоне и азоте

Для демонстрационного образца № 2 получено изменение температуры газа в сопле ЭТМД в районе критического сечения сопла при работе на азоте (рис. 12).

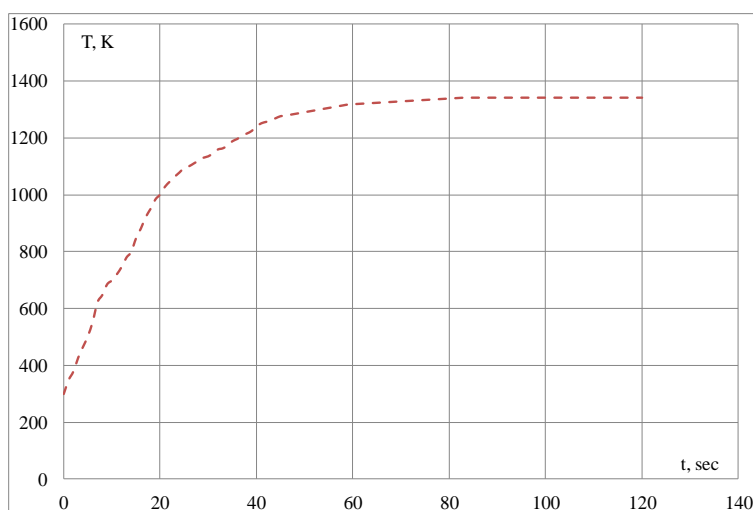


Рис. 12. Изменение температуры газа в сопле ЭТМД в районе критического сечения при работе на азоте (мощность 68 Вт)

Для демонстрационного образца № 2 получено изменение температуры газа в сопле ЭТМД в районе критического сечения сопла и конструкции ЭТМД в районе сопла при работе на аргоне (рис. 13).

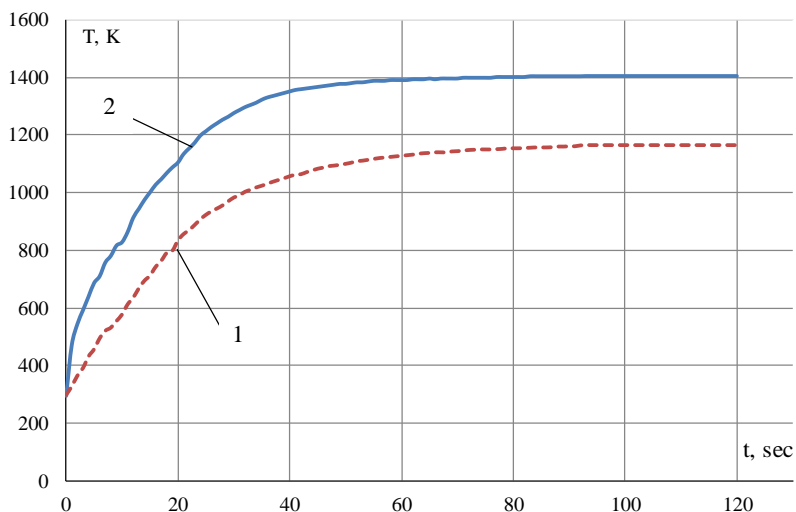


Рис. 13. Изменение температуры газа в сопле ЭТМД в районе критического сечения и конструкции ЭТМД в районе сопла при работе на аргоне (мощность 68 Вт):
1 – температура конструкции ЭТМД в районе сопла; 2 – температура газа

Исследования изменения геометрического профиля катода осуществлялось методом конфокальной микроскопии. Результаты исследования показали, что на поверхности катода видна характерная площадка износа (изображена белым цветом) (рис. 14).

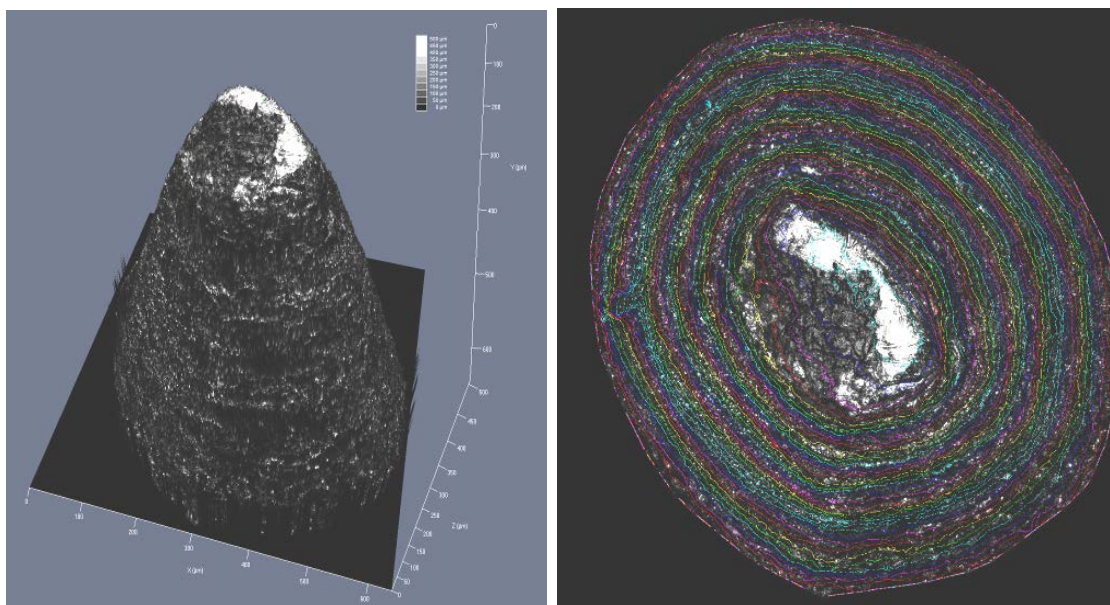


Рис. 14. Форма конической части катода

Исследования показали наличие износа в концевой части катода по характерной площадке износа, а затем относительно равномерное распределение параметров кольцевых окружностей вдоль катода.

Далее было проведено профилирование формы катода сечениями вдоль конической части. Профили формы катода строились по направлению площадки износа и перпендикулярно площадке износа. После построения профиля формы был нанесен изначальный параметр профиля, исходя из чертежа исходного катода (рис. 15).

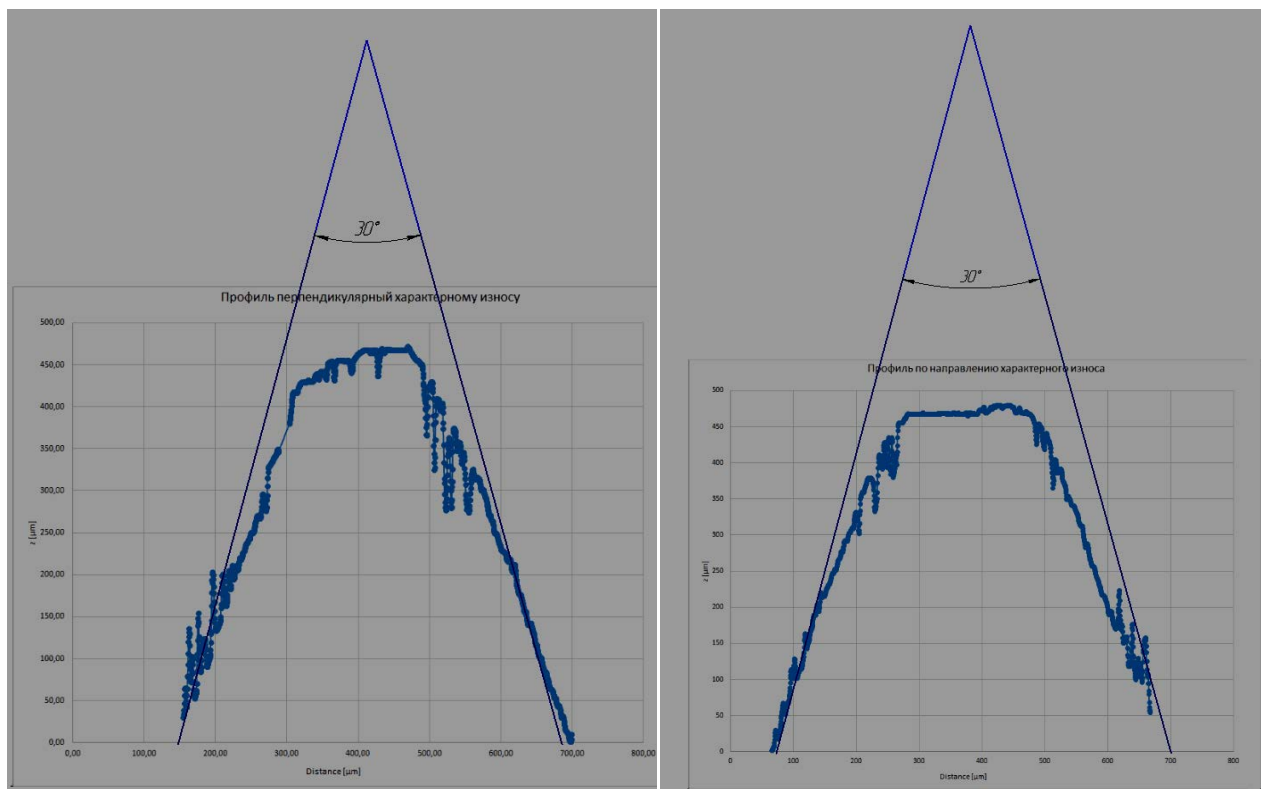


Рис. 15. Профиль формы катода, построенный перпендикулярно и по направлению к площадке износа

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С использованием результатов проведенных экспериментов по изменению температуры газа в сопле ЭТМД в районе критического сечения при работе на аргоне (мощность 68 Вт) и выражения (2) построен график изменения температуры газа в камере ЭТМД (рис. 16).

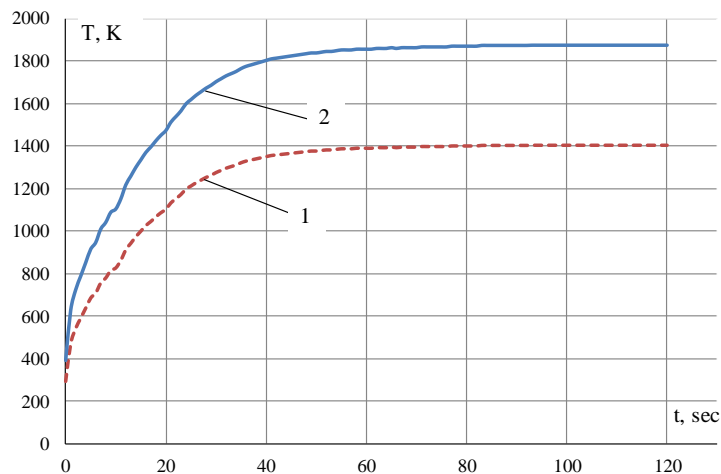


Рис. 16. Изменение температуры газа в сопле в районе критическом сечения (1) и в камере (2) электродугового ЭТМД при работе на аргоне

С использованием результатов проведенных экспериментов по изменению температуры газа в сопле ЭТМД в районе критического сечения при работе на азоте (мощность 68 Вт) и выражения (2) построен график изменения температуры газа в камере ЭТМД (рис. 17).

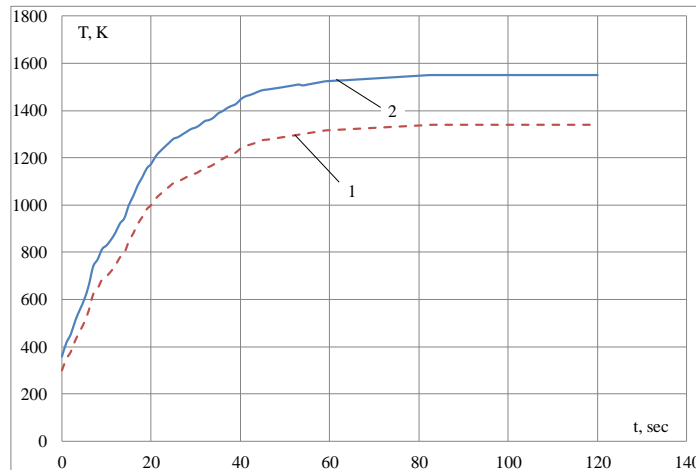


Рис. 17. Изменение температуры газа в сопле в районе критического сечения (1) и в камере (2) электродугового ЭТМД при работе на азоте

Эксперименты по исследованию работоспособности и температуры рабочего тела и конструкции ЭТМД при энергопотреблении 68 Вт показали:

- при расходах рабочего тела до 1.3 л/мин наблюдалось устойчивое горение дуги, а при большем значении расхода происходило нестабильное горение дуги;
- время выхода ЭТМД на стационарный режим составило 30...60 с;
- максимальная замеренная температура рабочего тела в сопле в районе критического сечения составила: для азота – 1340 К, для аргона – 1400 К;

Проведенные с использованием полученных экспериментальных данных расчеты температуры в камере ЭТМД показали: расчетная температура рабочего тела в камере на входе в критическое сечение сопла составила: для азота – 1580 К, для аргона – 1840 К.

Высота изношенной поверхности составила по перпендикулярному направлению – 359 мкм, по направлению площадки износа – 516 мкм.

Данный разброс может быть связан с особенностями исходной формы катода, которая может различаться от заданной геометрией образца.

Характер износа катода носит неравномерный характер, что может быть связано с особенностями конструкции системы катод-анод либо неоднородными свойствами материала системы.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате экспериментальных исследований электродугового ЭТМД на азоте и аргоне при потребляемой мощности 68 Вт подтверждена работоспособность ЭТМД путем визуализации устойчивой электрической дуги.

2. Экспериментально зафиксирована температура рабочего тела в сопле в районе критического сечения для азота – 1340 К, для аргона – 1400 К.

3. На основе экспериментов рассчитана температура рабочего тела в камере на входе в критическое сечение сопла для азота – 1580 К, для аргона – 1840 К.

4. Из расчетных данных следует, что при работе на аммиаке возможно достижение удельного импульса тяги не менее $P_{уд}=(300...350)$.

5. Полученные размеры высоты изношенной поверхности катода (по перпендикулярному направлению – 359 мкм, по направлению площадки износа – 516 мкм) свидетельствуют о неравномерном характере износа, который предположительно может быть объяснен:

- особенностями исходной формы катода, которая может отличаться от заданной геометрии;
- особенностями конструкции системы катод-анод;
- неоднородными свойствами материала.

Экспериментальные исследования износостойкости должны быть продолжены для подтверждения ресурсных характеристик ЭТМД.

6. Полученные экспериментальные данные по нагреву азота и аргона с учетом теплоемкостей азота, аргона и аммиака свидетельствуют о технической возможности создания электродугового ЭТМД на аммиаке с потребляемой мощностью до 70 Вт и удельным импульсом тяги не менее $P_{уд}=(300...350)$ с.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

The paper represents results of works carried out in the context of Grants Agreement No. 14.574.21.0104 as of 08.09.2014 (Unique Identifier of Applied Research RFMEFI57414X0104) concluded with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and related to applied researches.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The studies of Small Space Vehicles Ammoniac Electrothermal Engine Units Design and Structural Layout / V. N. Blinov, [et al.] // Modern Applied Science; Vol. 9, No. 5, 2015. ISSN 1913-1844, E-ISSN 1913-1852. Published by Canadian Center of Science and Education. DOI: 10.5539/mas.v9n5p337
2. Coxhill, I. The Evolution of Xenon Resistojet Propulsion Systems at SSTL Surrey Satellite / I. Coxhill, D. Gibbon, M. Drube // 5th International Spacecraft Propulsion Conference, Crete, May 2008.
3. Gibbon, D. The Design, Development and Testing of a Propulsion System for the SNAP-1 Nanosatellite / D. Gibbon, J. Ward, N. Ray // 14th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, August 2000.
4. Sweetin, M. N. Low-cost maneuvers for minisatellites using novel resistojet thrusters / M. N. Sweetin, T. Lawrence, J. Leduc // Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Vol. 213, part G, 1999, – P. 223-231.
5. Patent № 2332583 RF, IPC F 02 K 9/68. Electro-thermal micromotor / V. N. Blinov, [et al.] – No. 2000131736.
6. Patent № 2442011 RF, IPC F 02 K 9/68. Electro-thermal micromotor / V. N. Blinov, [et al.] – No. 2010127372.
7. Design features and research of Electrothermal Microthrusters with Autonomous Heating Elements for the Purposes of Small Space Vehicle Orbital Manoeuvring / V. N. Blinov, [et al.] // Indian Journal of Science and Technology, Vol. 8(27), IPL0581, October 2015. ISSN (Print): 0974-6846. ISSN (Online): 0974-5645. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i27/82937
8. Ходненко, В. П. Корректирующие двигательные установки для малого космического аппарата / В. П. Ходненко, А. В. Хромов // Вопросы электромеханики. – М., 2009. – Т. 109. – С. 27 – 32.
9. A Very Low Power Arcjet (VELARC) for Small Satellite Missions / G. Herdrich, [et al.] // Presented at the 32nd international Electric Propulsion Conference, 11 – 15 September, – Wiesbaden, 2011. – P. 1-17.

УДК 536.8, 629.783, 621.371

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ
МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
СВЧ-НАГРЕВА РАБОЧЕГО ТЕЛА

И. С. Вавилов, В. Н. Блинов, В. И. Рубан, В. В. Косицын, А. И. Лукьянчик, П. С. Ячменев, А. С. Власов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Работа посвящена разработке и апробации газодинамической модели корректирующего аммиачного микродвигателя с низким энергопотреблением и сверхмалой тягой для пикоспутников, массой до 5 кг, а также рассмотрению возможности применения СВЧ-нагрева рабочего тела. Показано, что простейший электротермический микродвигатель, состоящий из топливного бака, электроклапана, расширительной полости и камеры нагрева способен обеспечить за счёт газодинамических процессов и малого подвода теплоты сверхмалую тягу. Результаты проведённого исследования ставят задачи дальнейшего проектирования микроволновых генераторов для двигателей малых космических аппаратов.

Ключевые слова: малый космический аппарат, аммиак, тяга, расход, СВЧ.

I. ВВЕДЕНИЕ

XXI век с его микроминиатюризацией, электроникой, нанотехнологиями и стремлением к удешевлению без потери качества порождает жёсткие краевые задачи, связанные, в том числе, с интенсивным коммерческим, военным и научным освоением околоземного пространства. В последние годы в России заметно усилился интерес государства к космической отрасли. Это связано с естественными процессами восстановления наукоёмких технологичных производств, запуском первой ракеты с нового космодрома «Восточный», необходимостью создания своей навигационной системы и пр. Особенно заметны эти процессы в области проектирования и производства малых космических аппаратов.

Космос перестаёт быть уделом избранных, и университеты и лаборатории всего мира интенсивно развивают свои спутниковые направления. Примером такой адаптации к новым реалиям технического прогресса является создания такого формата малых космических аппаратов как CubeSat (Кубсат). При относительной дешевизне изготовления и их комплектующих подобные аппараты можно выводить на околоземное пространство групповым способом и разводить по орбитам функционирования. Для разведения и коррекции ошибок выведения используются реактивные микродвигатели разного принципа создания тяги.

Аммиачные корректирующие двигательные установки с омическими нагревательными элементами разрабатывались в ПО «Полёт» г. Омска и поставлялись заказчикам по всему миру. Далее, наработки были переданы ОмГТУ. Данные установки показали свою надёжность и способность выполнять поставленную задачу, но проектировались для спутников больших масс. Время ставит задачу минимизации габаритов спутника, массы, энергопотребления при сохранении надёжности. Соответственно, должны разрабатываться и поступать на рынок двигатели с меньшим расходом рабочего тела, меньшей массой, меньшей мощностью, меньшей цены и высокой надёжности.

Также следует рассматривать иные способы передачи энергии рабочему телу, иметь как можно меньше посредников на этом пути, что в итоге повышает КПД двигательной установки. Одним из таких способов является СВЧ-нагрев. Его отличает объёмность передачи тепла и отсутствие контакта с рабочим телом.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей, поставленной в данном исследовании, является проведение газодинамического расчёта тракта подачи рабочего тела малоомощного элементарного электротермического микродвигателя, применяемого для создания микротяги сверхмалых космических аппаратов формата CubeSat и рассмотрение возможности применения для нагрева рабочего тела микроволновой энергии.

III. ТЕОРИЯ

Схема исследуемой модели электротермического микродвигателя представлена на рис. 1.

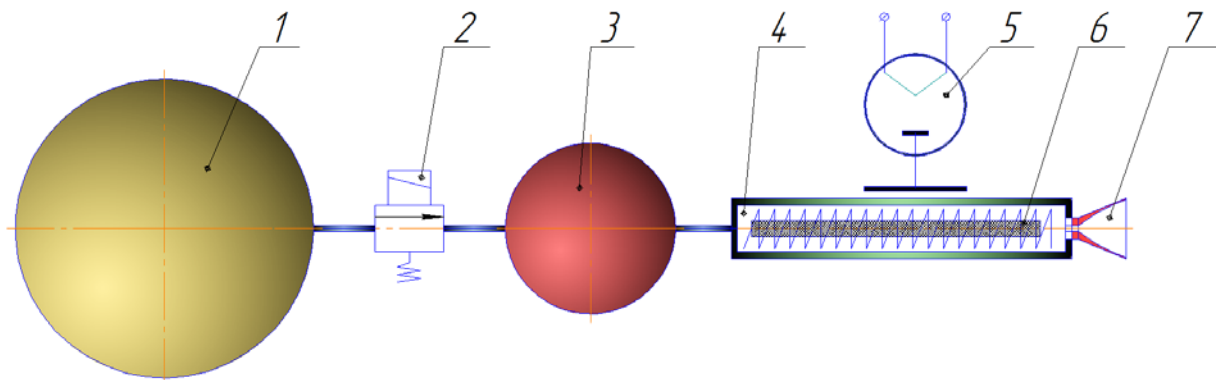


Рис. 1. Схема элементарного электротермического микродвигателя:

- 1 – бак высокого давления с рабочим телом; 2 – клапан электромагнитный; 3 – расширительная полость; 4 – камера нагрева рабочего тела; 5 – магнетрон; 6 – радиопоглощающий материал; 7 – сопло двигателя

Рабочим телом двигателя был выбран аммиак. Выбор аммиака в качестве рабочего тела обусловлен, в первую очередь, низкой температурой кипения и высоким давлением на линии насыщения. В баке 1 (рис. 1) аммиак находится в критическом состоянии, данное состояние обеспечивает постоянство давления на выходе из бака при постоянстве температуры внутри бака вне зависимости от объёма рабочего тела. Использование аммиака в качестве рабочего тела позволяет упростить конструкцию двигателя, не применяя вытеснительную систему.

Термодинамические параметры аммиака в баке 1 далее обозначаются индексом «1». Параметры на выходе из расширительной полости 2 обозначаются индексом «2».

Рассмотрим истечение аммиака из бака высокого давления в расширительную полость. Газ, находящийся под высоким давлением и низкой температуре, с большой точностью подчиняется уравнению состояния Ван-дер-Ваальса. Процесс истечения сопровождается эффектом Джоуля–Томсона, который ведёт к падению температуры газа при адиабатическом дросселировании.

В общем случае изменение температуры при адиабатическом дросселировании может быть выражено соотношением [1]:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{\frac{b \cdot R \cdot T}{(V-b)^2} - \frac{2 \cdot a}{V^2}}{c_p \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T},$$

где a, b – константы Ван-дер-Ваальса;

c_p – изобарная теплоёмкость;

R – универсальная газовая постоянная;

P, T, V – давление, температура и объём соответственно.

Вычисляя производную $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T$ из уравнения Клапейрона, получим:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{\frac{2 \cdot a}{R \cdot T} - b}{c_p}. \quad (1)$$

Константы Ван-дер-Ваальса для аммиака:

$$a_{NH_3} = \frac{27}{64} \cdot \frac{R^2 \cdot T_{кр}^2}{P_{кр}}, \quad b_{NH_3} = \frac{R \cdot T_{кр}}{8 \cdot P_{кр}},$$

где $P_{кр} = 113.2 \cdot 10^5$ Па,

$T_{кр} = 405.55$ К – параметры аммиака в критической точке [2].

Термодинамические параметры аммиака в баке P_1, T_1, c_{p1}

Термодинамические параметры аммиака в расширительной полости P_2, T_2, c_{p2}

Тогда из уравнения (1) имеем:

$$T_2 = \left(\frac{\frac{2 \cdot a_{NH_3}}{R \cdot T_1} - b_{NH_3}}{c_{p1}} \right) \cdot (P_2 - P_1) + T_1. \quad (2)$$

Давление и теплоёмкость аммиака в баке зависят от температуры бака, которая, в свою очередь, может принимать различные значения в зависимости от освещённости, работы бортовой аппаратуры. Диапазон температур конструкции двигателя в условиях космоса находится в диапазоне $-10^0\text{C} \dots +40^0\text{C}$ (например, обработка телеметрии МКА серии QL показала величину температуры конструкции в диапазоне $0^0\text{C} \dots 10^0\text{C}$).

По данным [2] можно построить зависимость давления аммиака в баке на линии насыщения от его температуры. Зависимость приведена на рис. 2. Область газообразного состояния аммиака выделена цветом.

Давление в расширительной полости P_2 назначаемая величина, выбирается в зависимости от потребной тяги микродвигателя.

Т.о., зависимость (2) позволяет получить величину температуры аммиака T_2 в расширительной полости. По полученным термодинамическим параметрам и зависимостью, приведённой на рис. 2, можно судить в каком агрегатном состоянии находится рабочее тело в расширительной полости.

После полости 3 (рис.1) рабочее тело попадает в камеру нагрева 4, где происходит увеличение скорости газа, путём подвода теплоты. Величина нагрева рассчитывается из условия гарантированного получения газовой фракции аммиака в камере.

Температуру в камере можно определить из соотношений:

$$\begin{aligned} Q &= m \cdot c_{p1} \cdot (T_3 - T_2) \\ Q &= m \cdot r_3 \end{aligned} \quad (3)$$

где Q – теплота, потраченная на испарение; m – масса аммиака; r_3 – удельная теплота парообразования аммиака при термодинамических параметрах газа в расширительной полости.

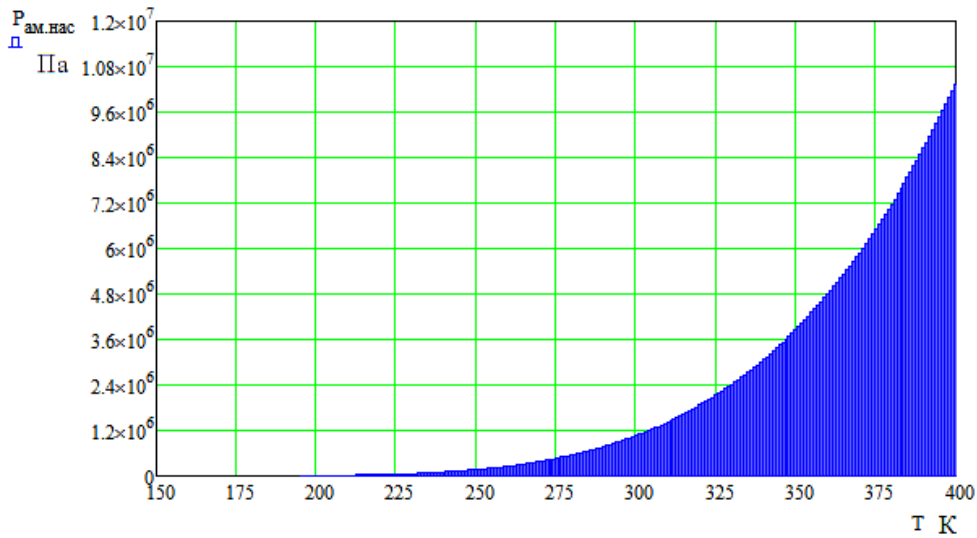


Рис. 2. Зависимость давления аммиака от температуры на линии насыщения

Выражая температуру T_3 из системы (3), получаем: $T_3 = \frac{r_3}{c'_{p2}} + T_2$. Здесь c'_{p2} – теплоёмкость жидкой фазы аммиака, если параметры рабочего тела в расширительной полости предполагают существование жидкой фазы. Если аммиак в полости газ, то можно принять $c'_{p2} = c_{p1}$.

Далее, движение газа рассматривается как одномерное течение с подогревом. Процесс подвода тепла вносит тепловое сопротивление, в камере полное давление падает [3].

Скорость газа при имеющемся перепаде давлений и величине подогрева определяется из уравнения Бернулли. Для случая истечения из расширительной полости имеем:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot P_2}{\rho_2 \cdot \left(2 \cdot \frac{T_3}{T_2} - 1\right)}}, \quad (4)$$

где ρ_2 – плотность газа на входе в камеру нагрева (плотность в расширительной полости). Эту величину можно определить из уравнения состояния Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P_2 + \frac{a_{NH_3} \cdot \rho_2^2}{M^2}\right) \cdot \left(\frac{M}{\rho_2} - b_{NH_3}\right) = T_2 \cdot R,$$

где M – молекулярная масса.

Показатель изоэнтропы аммиака в расширительной полости можно определить из соотношения:

$$k_2 = \frac{c''_{p2}}{c''_{p2} - R_{NH_3}}, \quad (5)$$

где c''_{p2} – теплоёмкость газовой фазы;

$R_{NH_3} = 488.162$ кДж/(кг · К) – газовая постоянная аммиака.

Т.о., определив температуру по выражению (3) и показатель изоэнтропы по выражению (5), можно вычислить критическую скорость газа на выходе из расширительной полости:

$$a_{kp2} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_2 \cdot R_{NH_3} \cdot T_2}{k_2 + 1}}.$$

Определим относительную скорость $\lambda_2 = \frac{V_2}{a_{кр2}}$.

Воспользуемся газодинамической функцией

$$q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (6)$$

Для истечения из расширительной полости по выражению (6) имеем:

$$q(\lambda_2) = \left(\frac{k_2+1}{2}\right)^{\frac{1}{k_2-1}} \cdot \lambda_2 \cdot \left(1 - \frac{k_2-1}{k_2+1} \cdot \lambda_2^2\right)^{\frac{1}{k_2-1}}.$$

Газодинамическая функция

$$z(\lambda_2) = \lambda_2 + \frac{1}{\lambda_2}. \quad (7)$$

После расширительной полости газ поступает в камеру нагрева, которая, в общем случае, представляет собой вихревую трубу с подогревом. Для удобства исследования рассмотрим камеру нагрева как два последовательно идущих элемента: местное сопротивление и цилиндрическую трубу подогрева (рис.3).

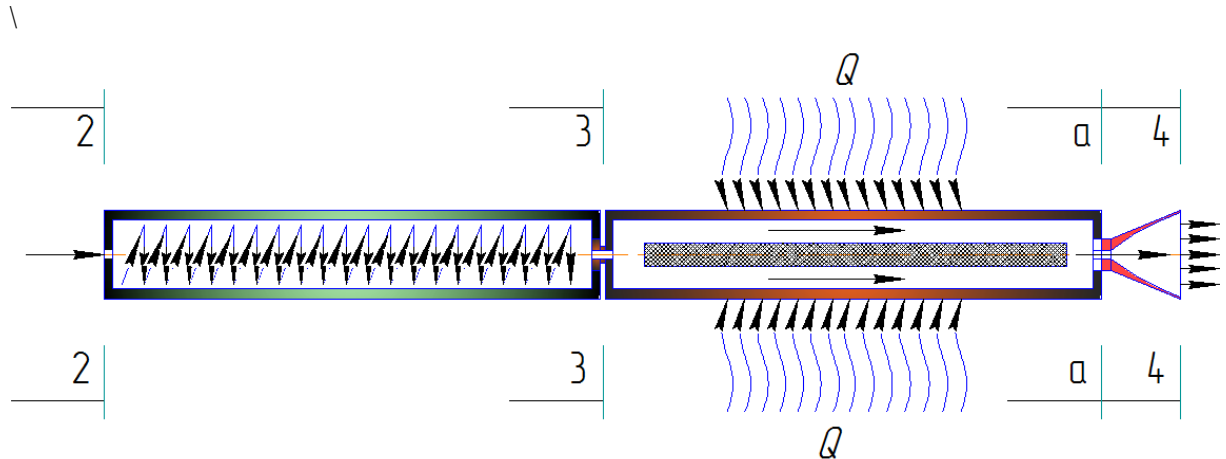


Рис. 3. Физическая модель камеры нагрева:

сеч. 2-2 – вход газа из расширительной полости; сеч. 3-3 – вход газа в подогреваемую трубу;
сеч. а-а – критическое сечение сопла; сеч. 4-4 – срез сопла; Q – подогрев рабочего тела

Относительная скорость в критическом сечении а-а при тепловом кризисе (достижении звуковой скорости) $\lambda_a = 1$. Тогда по выражению (7) имеем

$$z(\lambda_a) = \lambda_a + \frac{1}{\lambda_a} = 1 + \frac{1}{1} = 2.$$

Температура торможения в сопле (на участке 3-3-а-а) равна $T_3 = T_2$.

Потери давления в тракте двигателя (участок 2-2-3-3 рис. 3) можно определить по формуле Дарси–Вейсбаха [4] для гладкостенной трубы:

$$\Delta P_{TP} = 32 \cdot \nu_2 \cdot \frac{l_{TP}}{d_{TP}^2} \cdot \rho_2 \cdot V_2,$$

где ν_2 – кинематическая вязкость газа на входе в камеру нагрева;

l_{TP} , d_{TP} – длина и диаметр трубопровода соответственно.

Тогда давление в камере нагрева:

$$P_3 = P_2 - \Delta P_{TP}.$$

По полученным значениям термодинамических параметров газа в камере нагрева P_3 и T_3 по справочным данным [2] определяем изобарную теплоёмкость аммиака c''_{p3} . Аналогично определению показателя изоэнтропы аммиака в расширительной полости, определяется по выражению (5) показатель изоэнтропы для камеры нагрева:

$$k_3 = \frac{c''_{p3}}{c''_{p3} - R_{NH_3}}.$$

Критическая скорость в камере нагрева равна:

$$a_{kp3} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_3 \cdot R_{NH_3} \cdot T_3}{k_3 + 1}}.$$

Потери полного давления в полутепловом сопле при тепловом кризисе ($\lambda_a = 1$) можно определить по формуле [3]:

$$P_4 = P_3 \cdot \left(\frac{1 + \lambda_2}{2}\right)^2 \cdot \left[\frac{1 - \frac{k_2 - 1}{k_2 + 1} \cdot \lambda_2^2}{\frac{2}{k_2 + 1}}\right]^{\frac{1}{k_2 - 1}} \quad \text{или} \quad \sigma_{KP} = \frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{1 + \lambda_2}{2}\right)^2 \cdot \left[\frac{1 - \frac{k_2 - 1}{k_2 + 1} \cdot \lambda_2^2}{\frac{2}{k_2 + 1}}\right]^{\frac{1}{k_2 - 1}} \quad (8)$$

Расход газа через сверхзвуковое сопло определяется выражением [3]:

$$G_a = \frac{P_3 \cdot F_a}{\sqrt{T_3}} \cdot \left[\frac{2}{k_3 + 1}\right]^{\frac{k_3 + 1}{2 \cdot (k_3 - 1)}} \cdot \sqrt{\frac{k_3}{R_{NH_3}}}, \quad (9)$$

здесь F_a – площадь критического сечения сопла (задаётся конструктором).

Чтобы определить поперечное сечение подводящего канала нагревательной камеры, воспользуемся условием равенства расходов аммиака в исследуемых поперечных сечениях тракта двигателя. Имеем:

$$F_\kappa = \frac{G_a}{q(\lambda_2) \cdot B_{1G} \cdot \frac{P_2}{\sqrt{T_2}}}, \quad (10)$$

где $B_{1G} = \sqrt{k_2 \cdot \left(\frac{2}{k_2 + 1}\right)^{\frac{k_2 + 1}{k_2 - 1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_{NH_3}}}}$ – постоянная [5].

По выражению (10) определяют геометрические параметры проходного сечения подводящего канала. Сечение может быть круглым, прямоугольным или треугольным.

Тяга двигателя по теореме импульсов определяется формулой:

$$P_C = P_3 \cdot F_\kappa \cdot \left[\sigma_{KP} \cdot \frac{f(\lambda_4)}{q(\lambda_4)} - f(\lambda_2) \right], \quad (11)$$

или

$$P_C = P_a \cdot F_a \cdot \left(\lambda_a + \frac{1}{\lambda_a} \right) \cdot \left(\frac{2}{k_3 + 1} \right)^{\frac{1}{k_3 - 1}}, \quad (12)$$

где $f(\lambda_4) = (\lambda_4^2 + 1) \cdot \left(1 - \frac{k_3 - 1}{k_3 + 1} \cdot \lambda_4^2 \right)^{\frac{1}{k_3 - 1}}$ – газодинамическая функция;

$$q(\lambda_4) = \left(\frac{k_3 + 1}{2} \right)^{\frac{1}{k_3 - 1}} \cdot \lambda_4 \cdot \left(1 - \frac{k_3 - 1}{k_3 + 1} \cdot \lambda_4^2 \right)^{\frac{1}{k_3 - 1}} \quad \text{– газодинамическая функция;}$$

При истечении газа в вакуум ($P_{\text{вак}} = 0$) величина тяги увеличивается с ростом λ_4 . В этом случае газодинамическая функция давления равна $\pi(\lambda_4) = \frac{P_{\text{вак}}}{P_4} = 0$. Отсюда можно определить относительную скорость на срезе сопла:

$$\pi(\lambda_4) = \frac{P_{\text{вак}}}{P_4} = \left(1 - \frac{k_3 - 1}{k_3 + 1} \cdot \lambda_4^2\right)^{\frac{k_3}{k_3 - 1}} = 0.$$

Давление в критическом сечении при $\lambda_a = 1$ можно определить из соотношения [3]:

$$\frac{P_3}{P_a} = \left(\frac{k_3 + 1}{2}\right)^{\frac{k_3}{k_3 - 1}}.$$

По быстродействию клапана 2 (рис. 1) можно судить о объёме расширительной полости:

$$V_{\text{рп}} = \frac{G_a \cdot t}{\rho_2},$$

где t – время открытия–закрытия проходного сечения клапана.

Мощность, необходимая для нагрева рабочего тела с расходом G_a до температуры T_3 равна:

$$P = G_a \cdot c_{p3}'' \cdot (T_3 - T_2), \quad (13)$$

В то же время, удельная мощность электромагнитных колебаний, выделяющаяся в единице объёма радиопоглощающего материала, равна [6]:

$$P_{\text{уд}} = 0.278 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta \cdot |E|^2, \quad (14)$$

где $\varepsilon' = \frac{\varepsilon_a'}{\varepsilon_0}$, ε_a' – действительная часть абсолютной диэлектрической проницаемости среды;

$\varepsilon_0 = 8.85418 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ – электрическая постоянная;

f – частота СВЧ (для установок СВЧ нагрева выделены следующие частоты: 433 МГц \pm 0.2%, 915 МГц \pm 2.73%; 2450 МГц \pm 2.04%, 5800 МГц \pm 1.29%, 22125 МГц \pm 0.56% [6]);

$\text{tg} \delta = \frac{\varepsilon_a''}{\varepsilon_a'} + \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_a'}$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

ε_a'' – мнимая часть абсолютной диэлектрической проницаемости среды;

σ – удельная проводимость среды;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – круговая частота;

E – напряжённость электрического поля.

Тангенс угла потерь диэлектрика в общем случае $\text{tg} \delta \ll 1$ и в диэлектрике амплитуда электрического поля затухает. Для металлических проводников (и графита) $\text{tg} \delta \gg 1$, вследствие высокой удельной проводимости [7]. Следствием этого является более интенсивный нагрев при низкой напряжённости электрического поля.

Важной характеристикой проводников, применяемых в СВЧ-технике, является глубина скин-слоя. Она зависит от магнитной проницаемости среды. В этом случае графит, как диамагнетик, имеет преимущество перед металлами, т.к. обладает большей глубиной скин-слоя.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По полученной математической модели было проведено исследование элементарного электротермического микродвигателя.

Исходные данные для расчёта представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Параметр	Значение	Ед. измерения
Рабочее тело	аммиак	-
Температура корпуса двигателя	280	К
Диаметр критического сечения сопла	$0.8 \cdot 10^{-3}$	м
Внутренний диаметр трубопроводов рабочего тела	$2 \cdot 10^{-3}$	м
Суммарная длина трубопроводов	0.8	м
Давление в расширительной полости	$1 \cdot 10^4$	Па
Время открытия-закрытия клапана	2	с
Частота СВЧ-излучения	$2.45 \cdot 10^9$	Гц

В результате решения уравнений (1)...(14) были получены расчётные значения термодинамических параметров двигателя и его мощностные характеристики. Основные результаты исследования представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. измерения
Константы Ван-дер-Ваальса	a_{NH_3}	$4.237 \cdot 10^5$	$H \cdot M^4 / \text{кмоль}^2$
	b_{NH_3}	0.037	$M^3 / \text{кмоль}$
Температура газа в расширительной полости	T_2	213.326	К
Плотность газа в расширительной полости	ρ_2	0.0961	кг/м ³
Температура в камере нагрева	T_3	533.239	К
Давление газа в камере нагрева	P_3	$9.95 \cdot 10^3$	Па
Критическая скорость на входе в камеру нагрева	$a_{кр2}$	344.049	м/с
Критическая скорость на входе в сопло	$a_{кр3}$	540.982	м/с
Расход газа через сопло	G_a	$6.385 \cdot 10^{-6}$	кг/с
Тяга двигателя	P_C	$3.496 \cdot 10^{-3}$	Н
Мощность на нагрев рабочего тела	P	5.477	Вт
Объём расширительной полости	V_{PI}	$1.328 \cdot 10^{-4}$	м ³

Что касается СВЧ-нагрева, то полученные в результате газодинамического расчёта мощностные характеристики двигателя позволяют подойти к вопросу выбора радиопоглощающего материала. По формуле (14) при объёме материала $V_{PM} = 1 \cdot 10^{-6}$ м³ можно определить величину комплекса:

$$\varepsilon' \cdot tg \delta \cdot |E|^2 = \frac{P}{0.278 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot V_{PM}} = \frac{5.477}{0.278 \cdot 10^{-12} \cdot 2.45 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 8.042 \cdot 10^9 \quad (15)$$

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведённого исследования показали, что простейший электротермический микродвигатель малой тяги для пикоспутника имеет малое энергопотребление и простую функциональную зависимость термодинамических параметров от температуры конструкции аппарата. Построив характеристики двигателя для всех возможных температур, можно получить поле возможных тяг двигателя и обрисовать область применимости. Регулирование тяги двигателя возможно осуществлять изменением давления в расширительной полости, что, в

свою очередь, достигается временем открытия электроклапана. Величина нагрева рабочего тела в камере является зависимой величиной, но может быть использована в качестве регулирующего воздействия. Расчёт велся для случая не постоянного по тракту двигателя показателя изоэнтропы, что вносит дополнительные связи в конструкции математической модели.

Выбор способа передачи тепла рабочему телу также является актуальным. В данном исследовании предложен СВЧ-способ передачи энергии рабочему телу. Данный способ отличается быстрым объёмным нагревом рабочего тела или поверхности, омываемой рабочим телом.

Т.к. в данном исследовании в качестве рабочего тела был выбран аммиак, который не является проводником и является прозрачным для СВЧ-излучения, то рассматривался способ передачи тепловой энергии посредством радиопоглощающего материала (например, графит, медь). Следует отметить возможность применения добавок (например, воды, которая неограниченно растворяется в аммиаке), которые повысят проводимость рабочего тела, и, соответственно, отпадёт необходимость в радиопоглощающих посредниках.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Расход аммиака составил 6.385 мг/с;
2. Тяга двигателя составила 3.496 мН;
3. Температура в камере нагрева 533.329 К;
4. Мощность, идущая на нагрев рабочего тела 5.477 Вт.

5. В качестве радиопоглощающего преобразователя СВЧ-энергии в тепловую согласно формуле (15) хорошо подходят диамагнитные и ферромагнитные вещества с высокой удельной проводимостью и глубоким скрин-слоем.

Полученные данные позволяют начать проектирование СВЧ-генераторы для электротермических двигателей сверхмалых тяг.

Из расчёта следует, что данный электротермический микродвигатель можно применить для создания корректирующей микротяги сверхмалых космических аппаратов формата CubeSat. Данные аппараты являются маломощными, поэтому двигательная установка подобных спутников должна в сумме потреблять не более 10 Вт. Ещё одной особенностью данного класса космических аппаратов является то, что применяемые в них корректирующие двигательные установки не должны выдавать большую тягу. Это связано с минимизацией возмущающего момента от выпуска газа через реактивное сопло.

Кроме нагрева в двигателе имеется только один потребитель электроэнергии – это электромагнитный клапан. На данный момент производство способно обеспечить разработчиков маломощными малогабаритными низкорасходными быстродействующими клапанами с потреблением до 2 Вт.

Видно, что суммарная прогнозируемая потребляемая мощность двигателя не превышает 8 Вт.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Данные исследования проводятся в рамках финансовой поддержки Российским фондом фундаментальных исследований по Договору № 31 16-38-60089\15 от 02.12.2015 г. (НИР № Гр.46-15, рег. № АААА А161160202100195).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин В. Н. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т 2. Термодинамика и молекулярная физика. Изд. 5-е/ М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 544 с.
2. Голубев И. Ф. [и др.]. Теплофизические свойства аммиака. М.: Изд-во стандартов, 1978. 264 с.
3. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика: учеб. пособие для вузов: в 2 т. Изд. 5-е. М.: Наука, 1991. Т. 1. 600 с.
4. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. Изд. 3-е. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
5. Давидсон В. Е. Основы газовой динамики в задачах: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1965. 208 с.
6. Архангельский Ю. С. Справочная книга по СВЧ электротермии. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
7. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика. М.: Наука, 2003. 446 с.

УДК 629.78

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ТАНГАЖА РН С УЧЕТОМ АКТИВНОЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ СПУСКА ОТРАБОТАННОЙ НИЖНЕЙ СТУПЕНЬЮ

А. В. Кажанов

Войсковая часть, г. Новосибирск, Россия

Аннотация – Актуальность работы обуславливается направленностью на снижение техногенного воздействия на околоземное космическое пространство и районы падения отделяющихся частей ступеней, путем разработки и, в дальнейшем, использовании активной бортовой системы спуска (АБСС). Для определения проектно-баллистических параметров АБСС, обеспечивающей манёвр нижней отработанной ступени (ОС) ракеты-носителя (РН) с маршевыми жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) в заданную точку падения, разработан алгоритм определения оптимальной программы тангажа для первой и второй ступеней РН. Рассмотрена традиционная схема непрерывного выведения в классе линейных функций. Проведено подтверждение достоверности алгоритма определения программы тангажа на примере сравнения параметров штатного активного участка траектории выведения РН «Союз-2» этапа 1в без АБСС. Энергетический эффект применения АБСС заключается в использовании выведения РН по оптимальной траектории с обеспечением манёвра ОС в существующий район падения. На примере РН «Союз-2.1.в» показана энергетическая целесообразность использования АБСС, обеспечивающей извлечение невыработываемых остатков топлива в баках после выключения маршевого ЖРД, и манёвр ОС в заданную точку прицеливания.

Ключевые слова : программа тангажа, спуск, район падения, полезная нагрузка.

I. ВВЕДЕНИЕ

Решение задачи снижения поступления отработанных ступеней РН в защищаемые области низкоорбитального околоземного космического пространства, уменьшение площадей районов падения нижних отработанных ступеней РН предполагает разработку АБСС [1–3]. Для оценки изменения массы выводимого полезного груза РН при установке АБСС и выборе её основных проектно-конструкторских параметров необходима упрощённая инженерная методика выбора программы тангажа $\mathcal{G}_{np}^{yn}(\tau)$, которая достаточно близка к исходной оптимальной программе тангажа $\mathcal{G}_{np}^{opt}(\tau)$ без установки АБСС. В качестве такой методики предлагается методика, основанная на аппроксимации оптимальной программы тангажа, параметры которой определяются различными методами, например [6]. Предлагается аппроксимация $\mathcal{G}_{np}^{opt}(\tau)$ в виде N линейных участков различной длины τ_i и постоянными угловыми скоростями программного разворота $\dot{\mathcal{G}}_i$ на этих участках.

Для выбора программы тангажа $\mathcal{G}_{np}^{yn}(\tau)$ рассматривается уравнение движения РН как точки переменной массы в плоскости пуска и центральным полем тяготения, которая в форме Коши имеет вид [6]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{P}{m_{cm} - \dot{m}t} \cos \mathcal{G}_{np} - \frac{C_{Xa} q S}{m_{cm} - \dot{m}t} \cos \theta - \frac{C_{Xa} q S \alpha}{m_{cm} - \dot{m}t} \sin \theta - \frac{\mu}{x^2 + y^2} \sin \left(\arctg \frac{X}{Y} \right) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{P}{m_{cm} - \dot{m}t} \sin \mathcal{G}_{np} - \frac{C_{Ya} q S}{m_{cm} - \dot{m}t} \sin \theta - \frac{C_{Ya} q S \alpha}{m_{cm} - \dot{m}t} \cos \theta - \frac{\mu}{x^2 + y^2} \cos \left(\arctg \frac{X}{Y} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия, характерные для точки старта РН:

$$X(0) = 0, V_x(0) = 0, Y(0) = R_z, V_y(0) = 0, \text{ где } X = x_1, V_x = x_2, Y = x_3, V_y = x_4.$$

где:

q – скоростной напор,

ρ – стандартная плотность атмосферы,

C_{Xa}, C_{Ya} – аэродинамические коэффициенты для активного участка выведения,

\dot{m}, m_{cm} – массовый секундный расход топлива и начальная масса РН, соответственно,

α, θ – угол атаки и наклона вектора скорости РН соответственно,

P – тяга маршевого ЖРД.

Характерные точки схемы выведения на примере двухступенчатой РН типа «Союз-2» этапа 1в [7]:

– отделение ОС₁ по полной выработке рабочих запасов компонентов ракетного топлива и падения ОС₁ в заданную точку прицеливания;

– выключение маршевого ЖРД второй ступени по достижению условия выведения на круговую опорную ($H_{кр} = 200$ км) орбиту:

$$R_k \times V = (R_k \times \mu)^{0.5}, \quad (2)$$

где:

$$R_k = R_3 + H_{кр},$$

V – скорость полета РН, м/с

$$\mu = 3.986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3 / \text{с}^2$$

– условие окончания пассивного полёта ОС₁:

$$(x^2 + y^2) - R_3^2 = 0, \quad (3)$$

где:

x, y – координаты перемещения центра масс РН, м

$$R_3 = 6371 \text{ км}$$

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На примере традиционной непрерывной схемы выведения РН необходимо:

1. Разработать инженерную методику выбора программы тангажа $\mathcal{G}_{np}^{ym}(\tau)$.

2. Определить увеличение массы выводимой полезной нагрузки $\Delta m_{ПН}$ при выведении РН на опорную орбиту без учёта падения ОС₁ в заданную точку прицеливания.

3. Определить увеличение массы конструкции ОС₁ при установке АБСС, обеспечивающей манёвр падения ОС₁ в заданную точку падения.

4. Провести сравнительный анализ масс выводимой полезной нагрузки на опорную орбиту для следующих схем выведения РН и, соответственно, программ тангажа:

а) штатная схема (Z_1) выведения РН с учётом падения ОС₁ в заданную точку прицеливания;

б) выведение РН без учёта требований падения ОС₁ в заданную точку прицеливания (Z_0);

в) выведение РН без учёта требований падения ОС₁ в заданную точку прицеливания, с учётом установки АБСС, обеспечивающей манёвр падения ОС₁ в заданную точку падения (Z_2), определение параметров маневра в импульсной постановке (угол приложения $\theta_{АБСС}$ импульса и величину импульса ΔV)¹.

III ТЕОРИЯ

Определение программы тангажа $\mathcal{G}_{np}^{ym}(\tau)$

Для определения программы тангажа $\mathcal{G}_{np}^{ym}(\tau)$ представим её в виде суммы отрезков

$$\mathcal{G}_{np}^{ym} = \sum_{i=1}^N (\mathcal{G}_{0i} + \dot{\mathcal{G}}_i \cdot \tau_i), \quad (4)$$

где: N – количество участков кусочной функции программы тангажа;

$\dot{\mathcal{G}}_i$ – скорость разворота РН на каждом из i -ом участков полета РН;

τ_i – текущее время внутри i -го участка.

Ограничения: программа тангажа не должна содержать разрывов.

Критерием выбора изменяемых параметров является:

$$\min \tau_{2k}, \quad (5)$$

где: τ_{2k} – время работы ЖРД второй ступени

¹ С помощью АБСС придать некоторое значение импульса ΔV , полученное путем газификации остатков КРТ на борту ступени приложенный под углом $\theta_{АБСС}$ для увода ОС₁ в заданную точку прицеливания.

при этом масса полезного груза определяется из условия:

$$\Delta m_{PH} = m_{02} - \dot{m}_{2cm} \cdot \tau_{2k} - m_{kc} \quad (6)$$

где: m_{02} – начальная масса второй ступени РН, является постоянной в конкретном пуске РН;

\dot{m}_{2cm} – массовый секундный расход топлива ЖРД второй ступени РН;

m_{kc} – масса сухой конструкции второй ступени РН;

В результате варьирования количества участков N , их длительностей τ_i и угловых скоростей $\dot{\mathcal{G}}_i$ наименьшее время работы τ_{2k} для первой ступени РН достигается при $N=4$:

- вертикальный полет РН, скорость разворота $\dot{\mathcal{G}}_{0,1} = 0$,
- полет РН со скоростью разворота $\dot{\mathcal{G}}_{1,1}$,
- полет РН со скоростью разворота $\dot{\mathcal{G}}_{1,2}$,
- участок разделения ступеней со скоростью разворота равной нулю,
- время работы маршевого ЖРД первой ступени соответствует T_1 .

$$\mathcal{G}_{np1}^{yn}(\tau) = \begin{cases} \frac{\pi}{2}; 0 \leq t \leq 20, \\ \frac{\pi}{2} - \dot{\mathcal{G}}_{1,1}(t - 20); 20 \leq t \leq \tau_{1,1} \\ \mathcal{G}_{np1}^{yn}(\tau_{1,1}) - \dot{\mathcal{G}}_{1,2}(t - \tau_{1,1}); \tau_{1,1} \leq t \leq \tau_{1,2} \\ \mathcal{G}_{кон.н}; \tau_{1,2} \leq t \leq T_1 \end{cases} \quad (7)$$

Для определения программы тангажа второй ступени $\mathcal{G}_{np2}^{yn}(\tau)$ в начальный момент времени полета угол тангажа равен значению в конце активного участка траектории выведения первой ступени РН $\mathcal{G}_{np2}^{yn}(\tau) = \mathcal{G}_{np1}^{yn}(T_1)$:

$$\mathcal{G}_{np2}^{yn}(\tau) = \begin{cases} \mathcal{G}_{np1}^{yn}(T_1) - \dot{\mathcal{G}}_{2,1}t; 0 \leq t \leq \tau_{2,1} \\ \mathcal{G}_{np2}^{yn}(\tau_{2,1}) - \dot{\mathcal{G}}_{2,2}(t - \tau_{2,1}); \tau_{2,1} \leq t \leq \tau_{2,2} \\ \mathcal{G}_{кон.2}; \tau_{2,2} \leq t \leq \tau_{2k} \end{cases} \quad (8)$$

Для оценки достоверности алгоритма и программы интегрирования сравним параметры движения РН в момент выключения (T_1) ЖРД первой ступени:

Погрешность по высоте, км:

$$\varepsilon_H = \frac{H_{pac} - H_{зад}}{H_{зад}} 100\% = \frac{82.59 - 84.1}{84.1} 100\% = 1.8\%$$

где: H_{pac} , $H_{зад}$ – значения высот, полученные при использовании $\mathcal{G}_{np}^{omn}(\tau)$, $\mathcal{G}_{np}^{yn}(\tau)$ соответственно;

Погрешность по числу Маха:

$$\varepsilon_H = \frac{M_{pac} - M_{зад}}{M_{зад}} 100\% = \frac{9.31 - 9.42}{9.42} 100\% = 1.2\%$$

Как следует из приведённых оценок приближенности полученных параметров движения РН, по инженерной методике по формулам (1–8) к штатной оптимальной, программа тангажа $\mathcal{G}_{np}^{yn}(\tau)$ получена с точностью 1.8 %.

Параметры движения ОС₁ на пассивном участке траектории спуска определяются интегрированием системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{C_{Xa} q S}{m_{OC1}} \cos \theta - \frac{C_{Xa} q S \alpha}{m_{OC1}} \sin \theta - \frac{\mu}{x^2 + y^2} \sin \left(\arctg \frac{X}{Y} \right) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = -\frac{C_{Xa} q S}{m_{OC1}} \sin \theta - \frac{C_{Xa} q S \alpha}{m_{OC1}} \cos \theta - \frac{\mu}{x^2 + y^2} \cos \left(\arctg \frac{X}{Y} \right) \end{cases}$$

Начальные условия для пассивного полета ОС₁:

$$x_1(0)=X(T_1), x_2= V_x(T_1), x_3= Y(T_1), x_4= V_x(T_1).$$

Условие окончания интегрирования соответствуют (3).

C_{X_a} , C_{Y_a} – аэродинамические коэффициенты для участка свободного полета ОС₁.

IV РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исходные данные для выполнения проектно-баллистических расчетов представлены ФГУП ЦСКБ «Прогресс».

Результаты расчёта траекторных параметров выведения (координаты центров масс) для РН «Союз-2» этапа 1в при пуске с космодрома Восточный приведены на рис. 1

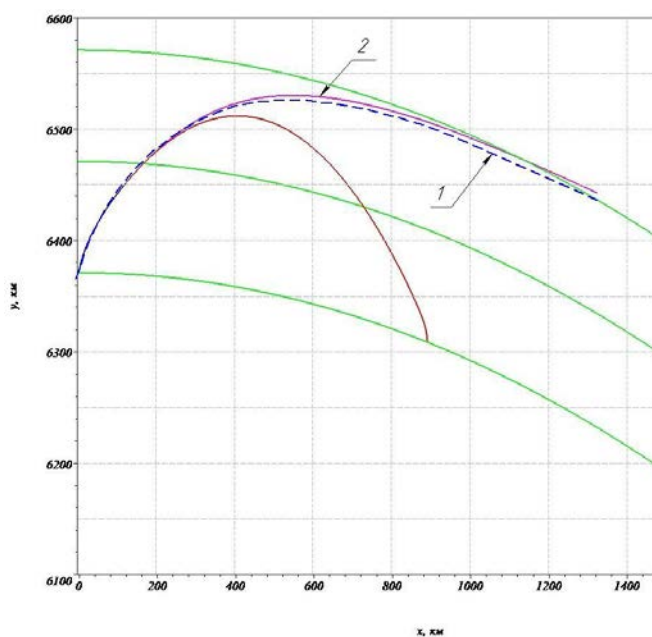


Рис. 1. Координаты центра масс РН «Союз 2» этапа 1в при выведении полезной нагрузки на опорную орбиту:
1 – в соответствии с оптимальной программой тангажа $g_{np}^{opt}(\tau)$;
2 – в соответствии с программой тангажа, определённой по предлагаемой методике $g_{np}^{yn}(\tau)$.

В баках ОС₁ после выключения маршевого ЖРД остались невырабатываемые остатки топлива в размере 1300 кг.

В соответствии с технологией использования АБСС [3] осуществляется извлечение энергетических ресурсов на основе их газификации. Предварительная оценка характеристической скорости, получаемая при реализации энергетических ресурсов, можно получить по формуле Циолковского:

$$\Delta V = U_1 \ln \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}{m_1 + m_3} \quad (10)$$

где: m_1 – «сухая» масса конструкции ОС₁;

m_2 – невырабатываемые остатки топлива в баках ОС₁;

m_3 – масса газогенерирующего состава для получения теплоносителей (~ 15% от массы остатков топлива);

m_4 – масса конструкции АБСС (система управления, источник питания, система газификации).

По предварительным оценкам масса конструкции системы газификации составляет до 1.5% от «сухой» массы конструкции ОС₁.

Полученные оценки характеристической скорости используются для реализации манёвра спуска ОС₁ в заданную точку прицеливания.

В табл. 1 приведены: масса АБСС для ОС₁, том числе, масса конструкции m_4 , масса топлива m_3 для получения теплоносителей для газификации невырабатываемых остатков топлива в баках после выключения маршевого ЖРД; массы выводимого полезного груза для схем Z_0, Z_1, Z_2 .

ТАБЛИЦА 1
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАСС ВЫВОДИМОЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

№ п/п	Схема выведения	Изменение массы полезного груза $\Delta m_{ПН}$, кг	Масса АБСС $\Delta m_{АБСС}$, кг	
			m_3	m_4
1	Z_1 (штатная схема)	-	0	
2	Z_0 (без учёта района падения ОС ₁)	476	0	
3	Z_2 (установка АБСС для манёвра ОС ₁ в заданную точку прицеливания)	422	m_3	141
			m_4	168

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Произведен баллистический расчет траектории полета РН с целью определения оптимальной программы тангажа. С помощью вариации описанных выше параметров удалось увеличить массу полезной нагрузки. Для верификации полученных результатов рассчитывалась траектория, которую сравнили с заданной траекторией полета по массе выводимой полезной нагрузки, по высоте полета РН и по изменению массы в результате выработки топлива в процессе полета. Результаты верификации показали, что расчетная модель и схема интегрирования составлены верно.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из приведённых в табл. 1 результатов, штатная схема выведения РН получена с точностью в пределах 1.8 %. В случае полета по схеме Z_0 получен результат увеличения массы полезного груза на 476 кг. С учетом установки АБСС на первую ступень РН в результате получаем положительный эффект массы полезной нагрузки на 422 ± 56 кг больше по сравнению со штатной схемой выведения РН и отсутствия АБСС.

Особую благодарность выражаю Трушлякову В.И., доктору технических наук, профессору кафедры Авиа- и ракетостроения ОмГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куденцов В. В., Одинцов П. В., Трушляков В. И., Шалай В. В. Развитие технологий снижения техногенного воздействия ракетных средств выведения на окружающую среду // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 4 (53). С. 117–124.
2. Шатров Я. Т., Баранов Д. А., Трушляков В. И., Куденцов В. Ю. Определение направлений разработки методов, технических решений и средств снижения техногенного воздействия на окружающую среду для реализации на борту космических средств выведения // Вестник Самарского аэрокосмического университета. 2011, № 1 (25). С. 38–49.
3. Баранов Д. А., Макаров Ю. Н., Трушляков В. И., Шатров Я. Т. Проект создания автономной бортовой системы увода отработавших ступеней ракет-носителей в заданные области // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 50 (84). С. 76–82.
4. Пат. 2414391 Рос. Федерация, МПК В 64 D1/26, В 64 С 15/14. Способ спуска отделяющейся части ступени ракеты космического назначения и устройство для его осуществления / Трушляков В. И., Куденцов В. Ю., Шатров Я. Т., Агапов И. В. № 2009123768/11; заявл. 22.06.09; опубл. 20.03.11, Бюл. № 8.
5. Пат. 2456217 Рос. Федерация, МПК В64G1/40, D64G1/24. Способ управления ракетами космического назначения. Трушляков В. И., Куденцов В. Ю., Шатров Я. Т. № 2010113169/11; заявл. 05.04.10; опубл. 20.07.12, Бюл. № 20.
6. Сихарулидзе Ю. Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 407 с.

УДК 536.42

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ
К ЗАДАЧЕ СЖИГАНИЯ ГОЛОВНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ
ПРИ ИХ СПУСКЕ В ПЛОТНЫХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

В. И. Трушляков, Д. Ю. Давыдович

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Рассмотрены альтернативные технические решения для снижения площадей районов падения створок головных обтекателей (СГО) ракет-носителей (РН), в том числе, на основе технологий аэродинамических манёвров (различные типы парашютных систем) и сжигание СГО с использованием пиротехнических составов (ПС). Проведена постановка задачи исследования параметров движения СГО, его теплового нагружения и прочности в процессе его движения на атмосферном участке траектории спуска при подведении дополнительной теплоты от инициированной ПС. Приведены математические методы и модели для решения сформулированной задачи, которые будут использованы на последующем этапе исследований.

Ключевые слова: головной обтекатель, пиротехнические составы, аэродинамика, термпрочность головного обтекателя

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема снижения экологического воздействия пусков РН на окружающую среду является одной из важнейших в практической космонавтике, в частности, наличие значительных площадей районов падения отделяющихся частей отработанных ступеней РН, СГО. После каждого пуска РН в районах падения проводятся работы по поиску отделившихся частей, СГО, их разделка и вывоз в места складирования с последующей утилизацией и т.д., что приводит, кроме нанесения ущерба окружающей среде и экономической деятельности хозяйствующих субъектов региона, дополнительную социальную напряжённость. Стоимость работ в районах падения, поддержание в готовности соответствующих технических служб значительна, что в конечном итоге ложится на стоимость пуска РН.

В настоящее время известны технические решения, обеспечивающие практически полное отсутствие районов падения отработанных ступеней РН, например, проводящиеся лётно-конструкторские испытания по мягкой посадке отработанных первых ступеней РН США «Фалкон-9» [1], космического корабля «Шепард» [2], проект «Россиянка» [3]. В стадии разработки проект «Байкал» [4], где рассматривается обеспечение управляемого аэродинамического спуска отработанной ступени РН «Ангара» в заданный район, в частности, на космодром.

Вместе с тем использование технологий снижения площадей районов падения отработавших ступеней РН [1–4] не решает проблемы районов падения СГО, площади которых в 3–5 раз превышают площади районов падения отработанных ступеней РН. В качестве примера сложившейся ситуации по районам падения СГО можно привести современную РН «Зенит»: при пусках с космодромов Байконур, Плесецк их площади достигают до 6000 кв. км для каждой трассы пуска. Такие размеры площадей районов падения СГО обусловлены динамикой неуправляемого полёта на атмосферном участке траектории их спуска, что, в свою очередь, вызвано случайным характером углового положения СГО, его конструкцией.

На рис. 1 приведены типовые конструкции головных обтекателей РН, размеры которых могут превышать диаметры ступеней РН (например, для РН семейства «Союз»), а по высоте до 10 м и более. Для изготовления современных головных обтекателей РН используют композиционные полимерные материалы, представляющие собой трёхслойную конструкцию, состоящую из алюминиевых сот, покрытой с обеих сторон углепластиком (рис. 2).

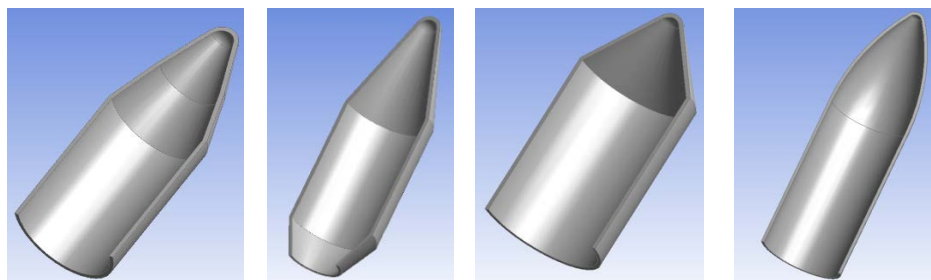


Рис. 1. Типовые варианты створок головных обтекателей

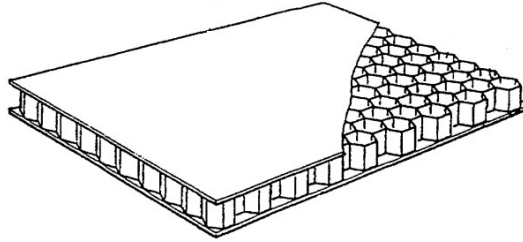


Рис. 2. Трехслойная панель с ячеистым наполнителем

Проведенный патентно-информационный поиск выявил несколько направлений разработок, направленных на снижение площадей районов падения СГО, для современных РН. Их можно разделить на два основных направления:

- аэродинамическое торможение с использованием различных парашютных систем;
- сжигание головного обтекателя при его движении на траектории спуска в плотных слоях атмосферы.

К первому направлению относятся: воздушно-космическая парашютная система [5]; управляемое отделение заглушек от конструкции обтекателя [6]; парашютная система, состоящая из тормозного парашюта и парашюта-крыла [7]; парашютная система, состоящая из тормозного парашюта и основного купольного парашюта [7] и т.д.

Применение воздушно-космической парашютной системы заключается в обеспечении ориентированного входа СГО в плотные слои атмосферы с одновременным гашением гиперзвуковой скорости, снижением аэродинамического и теплового нагружения на конструкцию СГО с целью предотвращения разрушения, начиная с момента отделения от РН и до момента приземления, а также последующей эвакуации, как целого объекта с места приземления [5].

Применение отверстий в конструкции СГО, закрытыми крышками, с возможностью их отделения в полете заключается в обеспечении устойчивой стабилизации СГО, обеспечение стабилизирующего момента без привлечения внешних средств стабилизации, путем снижения аэродинамического качества [6].

Применение парашютной системы, состоящей из тормозного парашюта и парашюта-крыла, предполагает схему спасения в воздухе. Тормозная система имеет стабилизационное назначение, а также обеспечивает разворачивание основного парашюта-крыла. Парашют-крыло обеспечивает низкую скорость снижения, а также придает горизонтальную скорость, тем самым увеличивается время для вертолетного захвата и спасения в воздухе [7].

Применение парашютной системы, состоящей из тормозного парашюта и основного купольного парашюта, предполагает схему спасения в море. Тормозной стабилизирующий парашют используется для гашения гиперзвуковой скорости спуска СГО в атмосфере. Основной парашют обеспечивает необходимое аэродинамическое сопротивление, чтобы замедлить скорость полёта СГО до приемлемой скорости спуска. Плавсредства (буи) не позволяют СГО затонуть, поддерживая ее на поверхности воды до прибытия спасательного судна [7].

Предварительный анализ вышеприведённых технологических, схемных и проектно-конструкторских решений, показал, что направление, основанное на аэродинамическом торможении, имеют как минимум одну общую особенность – использование парашютной системы. Все технические решения имеют сложную конструкцию, системы спасения, размещаемую внутри головного обтекателя. Сложно обеспечить достаточную надежность разворачивания таких систем, учитывая аэродинамические особенности спуска в атмосфере. Использование самолётов, вертолётных, морских судов, систем поиска, наличия благоприятных погодных условий, большого штата сотрудников обслуживающего персонала и т.д. всё это приводит к высоким экономическим затратам. Такие системы существенно удорожают стоимость послепусковых работ и, соответственно, стоимость пуска РН.

Второе направление предусматривает радикальное решение проблемы районов падения путём реализации сжигания СГО при спуске в плотных слоях атмосферы по аналогии сгорания фрагментов ступеней РН и космических аппаратов, входящих в атмосферу Земли со скоростями более 7 км/с [8, 9].

В связи с особенностями динамики полёта СГО на атмосферном участке траектории спуска нагрев СГО существенно ниже, чем при движении в составе РН на участке выведения. Это приводит к тому, что для обеспечения процесса горения СГО в кислороде набегающего воздушного потока необходимо дополнительная подача тепла, которая бы обеспечила разогрев СГО до температуры горения материала конструкции СГО в присутствии атмосферного кислорода. В качестве дополнительного источника тепла предлагается рассмотреть пиро-

технические составы (ПС), размещаемые в конструкции СГО. Инициирование ПС осуществляется при входе в слой атмосферы.

В качестве ПС возможно использование смесей с порошкообразным металлом, одним или несколькими, например, с порошками магния, алюминия, титана или их сплавов, а также солей или оксидов металлов: хлорат калия, перхлорат калия, оксид меди и другие. Использование того или иного состава ПС, его количества зависит от необходимого повышения температуры, требуемой для полного сгорания СГО на атмосферном участке траектории спуска.

Расположение ПС в конструкции СГО возможно в двух вариантах. Первый заключается в расположении порошкообразной смеси непосредственно в сотах трехслойной конструкции СГО. Второй вариант предполагает использование клеящих составов для приклеивания ПС в виде пластин на внутренней поверхности СГО [8,9].

Предлагаемое направление уменьшения площадей районов падения СГО кардинально решает эту проблему, позволяет выбирать оптимальные программы тангажа РН без учёта требований по обеспечению падения СГО в конкретные выделенные районы падения, отказаться от выделения районов падения и проведения работ по поиску, разделки и вывоза СГО в места складирования и утилизации. В конечном итоге это даёт существенное снижение стоимости эксплуатации РН, снижение экономических и социальных вопросов с регионами, в которых располагаются районы падения.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предлагаемая технология снижения площадей районов падения СГО является уникальной и не имеет аналогов, соответственно, отсутствуют методические подходы к её комплексному решению, хотя отдельные части этой задачи имеют эффективные методы решения и реализованные программные продукты [10].

К проблемным вопросам, требующим проведение дополнительных исследований, относятся:

- анализ термодинамического нагружения конструкции СГО, в том числе и с учётом тепловых притоков от ПС, при случайном характере полёта на всём атмосферном участке траектории спуска;
- выбор эффективного ПС для сжигания конструкции СГО в условиях полёта;
- разработка математической модели термостойкости конструкции СГО при горении ПС в процессе полёта СГО на атмосферном участке траектории спуска.

Для реализации предлагаемой технологии необходимо доставить к конструкции СГО необходимое количество тепла, выделяемое при сгорании ПС Q_{nc} в заданном интервале времени полёта (t_1, t_2) на траектории спуска для обеспечения его сгорания в кислороде набегающего потока воздуха за заданное время $\Delta t_{зад}$, при этом масса элементов конструкции, обеспечивающая сжигания конструкции СГО, включая ПС δm_{cso}^{nc} , была не более заданной:

$$[Q_{nc}, (t_1, t_2), \Delta t, \delta m_{cso}^{nc}]_{зад}. \quad (1)$$

Для рассмотрения возможных диапазонов термодинамического нагружения СГО при движении в плотных слоях атмосферы из-за случайного характера полёта СГО предлагается определить границы нижнего и верхнего термодинамического нагружения СГО:

$$[(X_a, Y_a), Q_a]_{max}, [(X_a, Y_a), Q_a]_{min}. \quad (2)$$

где: X_a, Y_a, Q_a – аэродинамические силы, тепловое нагружение, действующие на СГО.

Задача выбора эффективного ПС из существующих, обеспечивающего доведение температуры СГО для горения на атмосферном участке траектории спуска, предусматривает разработку математической модели процесса горения, выбранного ПС, в том числе, тепловые притоки в зависимости от параметров окружающей среды, краевых условий контакта ПС и СГО:

$$[\dot{Q}_{nc}(R, V)]_S \quad (3)$$

где: \dot{Q}_{nc}, R, V, S – тепловой поток от горящего i -го ПС, координаты и скорости движения СГО, краевое условие контакта ПС по поверхности конструкции СГО, соответственно. Эта зависимость определяет теплопритоки от ПС в зависимости от внешних условий (давление, наличие кислорода, унос тепла набегающим потоком воздуха), краевых условий размещения ПС по поверхности конструкции СГО.

Разработка математической модели термодинамического нагружения конструкции СГО при горении ПС предусматривает оценку прочностных характеристик СГО, в том числе критерий разрушения:

$$[T(\dot{Q}_{nc}, R, V, S), N(\dot{Q}_{nc}, R, V, S)] > [T, N]_{разр} \quad (4)$$

где: T, N – тангенциальные и нормальные силы, возникающие в результате теплового и аэродинамического воздействия в конструкции СГО

Таким образом, постановку задачи разработки методических подходов по сжиганию СГО можно сформулировать следующим образом:

Необходима разработка математических моделей (2) – (4) при ограничениях (1) с последующей их совместной численной реализацией с привлечением суперкомпьютера типа Intel Xeon, с общей производительностью не менее 1 терафлоп.

III. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В настоящее время интенсивно рассматриваются задачи практической космонавтики, связанные с входом объектов в атмосферу с гиперзвуковыми скоростями и деградацией материалов конструкций объектов, в том числе, спасаемых полезных нагрузок, отработанных ступеней ракет и другого космического мусора от аэродинамического и теплового нагружения [11, 12, 13].

Значительная часть исследований направлена на обеспечение безопасности возвращаемых объектов, в том числе и обитаемых, что достигается использованием современных композиционных полимерных материалов, различных абляционных покрытий [14, 15, 16].

Исследований по обеспечению сжигания объектов при входе в атмосферу с гиперзвуковыми скоростями не выявлено, таким образом, имеет место обратная задача традиционным исследованиям, направленным на повышение термостойкости конструкций при входе в атмосферу с гиперзвуковыми скоростями [14, 15].

Общим методическим подходом в этих задачах является определение прочности конструкции ЛА как функции от термодинамического нагружения, обусловленного набегающим атмосферным потоком. В рассматриваемом классе задач, кроме учёта вышеупомянутых факторов воздействия, присутствует дополнительный тепловой приток, обусловленный горением ПС.

Кроме этого, необходимо исследовать:

- условие сгорания СГО, выполненного из ПКМ;
- условие разрушения (диспергирования) СГО;

Установка выбранного ПС на СГО, процесс его зажигания и горения требует дополнительного анализа ряда условий:

- влияние граничных условий (давление окружающей среды и состав кислорода, набегающий поток воздуха, углы атаки, схемы размещения в конструкции СГО) на параметры процесса теплопритоков от ПС к конструкции СГО;
- физико-химические свойства выбранного ПС, и т.д.

В конечном итоге необходимо решение совместной системы уравнений аэро- и термодинамики, термостойкости ПС с учётом горения ПС.

Итогом решения задачи является определение прочности СГО при различных вариантах размещения ПС

К выбору математических моделей

Траектория движения СГО включает в себя две области:

- область свободномолекулярного движения, что соответствует высотам более 70– 80 км над поверхностью Земли;
- область сплошной среды, что соответствует высотам менее 70 км.

В настоящее время для моделирования обтекания летательных аппаратов в атмосфере используют в основном методы, основанные на решении уравнений Навье–Стокса [7], преимущественно для сверхзвуковых течений и методы с применением решеточных уравнений Больцмана в случае трансзвуковых и дозвуковых режимов обтекания [7]. Для режимов свободномолекулярного движения молекул, соответствующих высотам более 100 км над поверхностью Земли, прибегают к использованию методов Монте-Карло [17].

В связи с тем, что сжигание СГО предлагается с использованием кислорода воздуха, что соответствует высотам менее 70 км, принимается математическая модель сплошной среды, описываемая уравнениями Навье–Стокса, для сверхзвуковых режимов обтекания и метод решеточных уравнений Больцмана – для дозвуковых режимов обтекания.

В дополнение к методам прикрепляются модели турбулентности. На сегодняшний день наиболее актуальной для данного класса задач является SST модель Ментера [18].

Также нельзя не учитывать динамику полета СГО, с учетом его термодеструкции на атмосферном участке траектории спуска, подобная задача описана на примере полета фрагментов космического мусора в атмосфере [19].

Для формирования полной системы уравнений, в соответствии с постановкой задачи (1)–(4), к аэродинамической системе уравнений следует присоединить уравнения тепло- и массообмена, с учётом горения ПС и термомпрочности конструкции СГО.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

К полученным результатам следует отнести:

- проведенный анализ разрабатываемых систем спасения СГО и выбор конкретной технологии координального снижения площадей районов падения СГО на основе их сжигания;
- проанализированы специфика рассматриваемого класса задач и возможные методы их решения, в том числе, по тепловому и аэродинамическому нагружению объектов, входящих в атмосферу с гиперзвуковой скоростью, а также движущихся объектов с дозвуковой скоростью;
- сформулирован состав системы сопряженных уравнений, включающих уравнения, описывающие, движение объектов при входе в атмосферу, теплового нагружения, прочности и термодеструкции полимерных композиционных материалов.

V. ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ существующих технологий снижения площадей районов падения СГО, и выбрана технология, основанная на сжигании СГО при движении на атмосферном участке траектории спуска.
2. Для обеспечения условий сжигания СГО предлагается использование пиротехнических составов, выбор которых и методы их установки в конструкцию СГО представляет собой самостоятельную задачу.
3. Методологической основой решения данной задачи является использование системы сопряженных уравнений, описывающих аэродинамические, термомпрочностные и термодеструкционные процессы, происходящие в СГО при горении пиротехнических смесей.
4. Численная реализация предложенной сопряженной системы уравнений, описывающей процесс сгорания СГО, будет осуществляться на следующем этапе исследования.

Исследования проводились при поддержке гранта РНФ по проекту «Разработка научно-технических основ сжигания отделяющихся элементов конструкций ракет космического назначения с целью снижения площадей районов их падения» Соглашение № 16-19-10091 от 18.05.2016 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Falcon 9 attempts ocean platform landing. URL: www.spacex.com/news/2014/12/16/x-marks-spot-falcon-9-attempts-ocean-platform-landing (дата обращения: 20.04.2016).
2. The New Shepard system. URL: <https://www.blueorigin.com/technology> (дата обращения: 20.04.2016).
3. Ракета-носитель «Россиянка». URL: <http://makeyev.ru/roospace/rossiyanka/> (дата обращения: 20.04.2016).
4. Многоразовый ускоритель «Байкал». URL: <http://npo-molniya.ru/uskoritel-baikal> (дата обращения: 20.04.2016).
5. Пат. 2495802 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/62. Способ применения парашютной системы для спасения отработанных ступеней ракет-носителей или их частей и спускаемых космических аппаратов / Гвоздев Ю. Н., Иванов П. И., Мехоношин Ю. Г., Чижухин В. Н., Юшков В. А. № 2011109914/11; заявл. 17.03.11; опубл. 20.10.13, Бюл. № 29.
6. Пат. 2223896 Российская федерация, МПК В 64 G 1/62. Отделяемый от гиперзвукового летательного аппарата элемент, обладающий аэродинамическим качеством / Болотин В. А., Никитин Н. Д. № 2002121981/11; заявл. 12.08.02; опубл. 20.02.04, Бюл. № 5.
7. Wiesendanger A. RUAG Reusable payload fairing: 32nd National space symposium // Colorado Springs. US. April 11–14, 2016.
8. Trushlyakov V., Lempert D., Zarko V. The use of thermite-incendiary compositions for burning of fairing of space launch vehicle. Использование термитно-зажигательных смесей для сжигания обтекателей ракет космического назначения // New Trends in Research of Energetic Materials: 18th international seminar Pardubice. Czech Republic, April 15–17. 2015. Vol. 2P. 901–904.
9. Пат. 2581636 Российская Федерация, МПК F 42 В 10/46 В 64 G 1/64. Головной обтекатель ракеты. Трушляков В. И. [и др.]. № 2015105466/11; заявл. 17.02.15; опубл. 20.04.16, Бюл. № 11.
10. Dimitrienko Y. Thermal stresses and heat-mass transfer in ablating composite materials // International journal of heat and mass transfer. 1995. Vol. 38, no. 1. P. 139–146.

11. Michael A. Shoemaker, Jozef C. van der Ha, Shinsuke Abe, and Kazuhisa Fujita. Trajectory Estimation of the Hayabusa Spacecraft during Atmospheric Disintegration // Journal of Spacecraft and Rockets. 2013. Vol. 50, no. 2. P. 326–336.
12. B. Fritsche, H. Klinkrad, A. Kashkovsky, E. Grinberg. Spacecraft disintegration during uncontrolled atmospheric Re-entry // Acta Astronautica. 2000. Vol. 47, no. 2. P. 513–522.
13. Balakrishnan Deependran, Kurian Job. Material Thermal Degradation Under Reentry Aerodynamic Heating // Journal of Spacecraft and Rockets. 2014. Vol. 51, no. 4. P. 1319–1328.
14. Manu. J, G. Roy N, Vinod Dr. Mathews. Thermo-Structural Analysis of Thermal Protection System for Re-Entry Module of Human Space Flight // International Journal of Science. Engineering and Technology Research. 2016. Vol. 5, no. 1. P. 125–137.
15. Tetsuya Yamada, Yoshifumi Inatani, Ken'ichi Hirai. Thermal Responses of Ablator for Reentry Capsules with Superorbital Velocity // The Institute of Space Astronautical Science. Report SP. 2003. No. 17. P. 201–215.
16. Ayasoufi Anahita, Rahmani Ramin, Roy Gary Cheng, Koomullil and Kshitij Neroorkar. Numerical Simulation of Ablation for Reentry Vehicles // 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. San Francisco, California, 2006.
17. Mazzaracchio Antonio, Marchetti Mario. A probabilistic sizing tool and Monte Carlo analysis for entry vehicle ablative thermal protection systems // Acta Astronautica. 2010. Vol. 66. P. 821–835.
18. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. K., Nagano Y., Tummers M. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, turbulence, heat and mass transfer 4, ed. Hanjalic // Begell House, Inc. 2003. P. 625–632.
19. Ashish Tewari. Entry Trajectory Model with Thermomechanical Breakup // Journal of Spacecraft and Rockets. 2009. Vol. 46, no. 2. P. 299–306.

УДК 629.76

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ ИСПАРЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ

В. И. Трушляков¹, В. Ю. Куденцов¹, И. Ю. Лесняк¹, Л. Гальфетти²

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Миланский политехнический университет, г. Милан, Италия

Аннотация – Для исследования процесса тепло – и массообмена, происходящего в топливном баке отработавшей ступени ракеты-носителя (РН) при испарении жидких остатков компонентов ракетного топлива (КРТ) разработаны предложения на модернизацию существующего экспериментального стенда и программа экспериментальных исследований, включающая в свой состав серию подготовительных и основных экспериментов. В качестве теплоносителя (ТН), подаваемого в объём экспериментальной модельной установки (ЭМУ) предлагается использовать смесь газов, позволяющих получить синтезированный ТН с параметрами (теплоёмкость, малярная масса), максимально приближенными к параметрам газа, получаемого на выходе из газогенератора. Формирование требований к синтезированному ТН осуществляется с учетом обеспечения условий подбора процессам, происходящим при испарении КРТ в объёме реального топливного бака отработавшей ступени РН. В качестве базовых критериев подбора приняты числа Рейнольдса, Прандтля и Нуссельта. По результатам предварительно проведенных экспериментальных исследований получены коэффициент теплоотдачи системы «газ-жидкость-стенка» и критериальные уравнения для граничных условий расположения жидкости на пластине «капля», «зеркало» и ТН – воздух, азот.

Ключевые слова: тепло- и массообмен, эксперимент, теплоноситель, испарение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование процесса тепло- и массообмена в объёме бака РН при взаимодействии набегающего потока ТН с жидкими остатками топлива и стенками бака в условиях неопределенности граничного положения топлива является актуальной задачей [1]. Протекание процесса тепло- и массообмена между участниками теплообмена (ТН, жидкость, стенки бака и газ наддува) существенно отличается от известных тепловых процессов, граничных условий, конструкционных материалов [2–9], поэтому использование существующих результатов ис-

следований в виде коэффициентов теплоотдачи и критериальных уравнений невозможно и их необходимо определять экспериментально для каждого варианта участников теплообмена.

Предлагаемые экспериментальные исследования являются продолжением работ, проводимых на лабораторной базе Омского государственного технического университета и Миланского технического университета [10–11].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенные ранее исследования [10–11] были направлены на определение коэффициентов теплоотдачи системы «газ-жидкость-стенка» при использовании в качестве ТН – воздуха или азота, а в качестве модельных жидкостей – воды, спиртовых смесей и керосина.

Для повышения достоверности процесса моделирования предлагается использование ТН с близким химическим составом и физико-химическими параметрами, которые будут использоваться в реальном процессе, при этом для экспериментального определения коэффициентов теплоотдачи от смеси газов (синтезированный ТН + газ наддува + испарившийся компонент) к жидкости и стенкам бака при использовании синтезированных ТН на основе смеси газов, необходимо:

– модернизировать существующий экспериментальный стенд, в составе: система получения ТН, ЭМУ, система измерений, регистрации и обработки результатов измерений, соединительная и запорная арматура с учётом обеспечения критериев подобия Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля;

– разработать методику, программу и схему проведения экспериментов;

– разработать исходные данные для проведения исследований:

а) температура, расход, химический состав ТН;

б) масса, температура, граничное условие и химический состав модельной жидкости.

III. ТЕОРИЯ

На рис. 1 представлена схема модернизированного экспериментального стенда [12], в состав которого входят следующие основные системы:

1. Система получения ТН на основе использования:

– баллонов с газами, смесителя, газовых редукторов, нагревателя;

– компрессора, ресивера, фильтра-регулятора и нагревателя.

2. ЭМУ с устройствами ввода ТН и пластиной с нагревательным элементом.

3. Вытяжная камера для удаления продуктов газификации из лабораторного помещения.

4. Система регистрации, контроля и обработки результатов измерений (мобильные и стационарные датчики температуры, датчики давления, расхода, влажности и скорости газа).

5. Соединительная и запорная арматура, в виде системы шлангов, штуцеров, шаровых кранов, которые обеспечивают герметичность соединений при избыточном давлении до 5 атм.

Проектно-конструктивные параметры ЭМУ определялись из условий обеспечения подобия процессов тепло- и массообмена, протекающих в реальных баках второй ступени (блок «И») РКН «Союз-2.1в» при газификации остатков топлива на пассивном участке полета, что соответствует следующим значениям критериев Рейнольдса (100000–500000), Прандтля (0,7–0,75), Нуссельта (300–2000) и Релея ($8 \cdot 10^6 - 10^{14}$).

В соответствии с этими значениями критериев выбраны следующие параметры ЭМУ, ТН и модельной жидкости:

– скорость ТН и расход на входе в ЭМУ выбираются из условия подобия по числам Рейнольдса и соответствуют: $g = 4 - 7 \text{ м/с}$; $\dot{m} = 4 - 5 \text{ г/с}$;

– размеры ЭМУ выбираются из условия характерного линейного размера, необходимого для расчета чисел подобия; и соответствуют: $V_{\text{ШХГ}} = 500 \times 500 \times 200 \text{ мм}$;

– масса испаряемой жидкости - 50–100 гр., которой достаточно, чтобы полностью закрыть площадь поверхности пластины и образовать «зеркало» и «капли» жидкости;

– варианты размещения жидкости: «зеркало», «капли», обусловленные возможным расположением остатков КРТ в баках РКН на пассивном участке полета, после выключения маршевого жидкостного ракетного двигателя;

– параметры используемого газа (кинематическая вязкость, плотность, теплопроводность, удельная теплоёмкость) выбираются из условия подобия по числам Прандтля и выбраны $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} - 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho = 0.9 - 1.2 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0.025 - 0.031 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; $c_p = 1.005 - 1.009 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$;

– параметры модельной жидкости (температура, кинематическая вязкость, теплопроводность, удельная теплоёмкость, плотность) выбираются из условия подобия по числам Рейля и выбраны $T = 283 - 353 K$; $\nu = 0.365 \cdot 10^{-6} - 1.307 \cdot 10^{-6}$; $\lambda = 0.574 - 0.674 \text{ Вт/м} \cdot K$; $c_p = 4.197 - 4.182 \text{ кДж/кг} \cdot K$; $\rho = 971.8 - 998.2 \text{ кг/м}^3$.

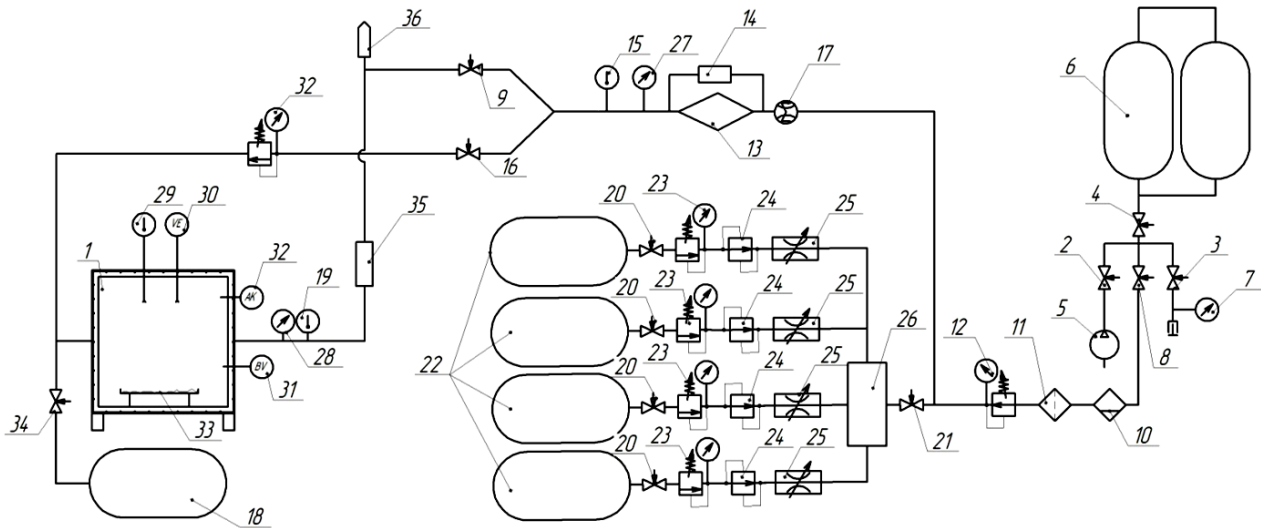


Рис. 1. Схема модернизированного экспериментального стенда: 1 – экспериментальная модельная установка (ЭМУ); 2, 3, 4, 8, 9, 16, 20, 21, 34 – клапан (вентиль); 5 – компрессор; 6 – ресиверы; 7, 27, 28 – датчик давления; 10 – влагоотделитель; 11 – фильтр; 12, 23, 32 – ЭПК с датчиком давления; 13 – электронагреватель; 14 – трансформатор; 15, 27, 28 – стационарный датчик температуры; 17 – расходомер; 18 – баллон с газом наддува (гелий); 19 – стационарный датчик температуры; 22 – баллон с газом (например H_2 , H_2O , CO , CO_2 , CH_4); 24 – редуктор; 25 – дроссель; 26 – смеситель; 29 – мобильный датчик температуры; 30 – датчик скорости потока ТНр; 31 – датчик влажности газа в ЭМУ (гигрометр); 32 – анализатор шума и вибраций; 33 – пластина с нагревательным элементом; 35 – газоанализатор; 36 – утилизатор

Программа экспериментальных исследований на модернизированном экспериментальном стенде включает две группы экспериментов:

1. Подготовительные эксперименты для отработки измерительного комплекса и системы получения ТН.

Основная задача данной группы экспериментов – отработать процесс смешения газов до нужной консистенции и получить на выходе из смесителя ТН наиболее близкий по физико-химическим параметрам к реальному ТН из газогенератора. В случае отклонения состава газа на выходе из смесителя от заданного значения осуществляется регулировка расхода газов с помощью редукторов, расположенных на каждом баллоне.

Система получения газа (воздуха) позволяет проводить технологические эксперименты, в том случае, когда реальный ТН можно не использовать, например, при определении значений скоростей потока газа в различных точках ЭМУ, а также при прогреве электронагревателя.

2. Основные эксперименты, направленные на определение коэффициентов теплоотдачи от смеси газов (синтезированный ТН + газ наддува + испарившийся компонент) к жидкости и стенкам ЭМУ при использовании синтезированных ТН.

Методика проведения основных экспериментов, направленных на определение температуры системы «газ-жидкость-стенка», площади массоотдающей поверхности, влажности газа на выходе из ЭМУ заключается в следующем (рис.1).

Перед подачей ТН с заданной температуры $T_{ТН}$ в ЭМУ, предварительно проводят нагрев электронагревателя и прогрев соединительной и запорной арматуры горячим воздухом для снижения затрат ТН на нагрев до температуры $T_{ТН}$.

Предварительно закрываются все вентили, кроме вентиля 2–4 и включаются все электроприборы и оборудование. Воздух нагнетается компрессором 5 через вентили 2–4 и заполняет ресивер, состоящий из двух баллонов 6.

После достижения в ресивере 6 определенного давления (до 10–16 атм.), измеряемого с помощью манометра 7, открываются последовательно вентили 8 и 9 и воздух попадает во влагоотделитель 10. Далее, проходя через систему фильтрации 11, которая представляет собой блок фильтров, и предохранительный пневмоклапан 12 с датчиком давления, по которому устанавливается рабочее давление, воздух поступает в нагреватель 13, который регулируется с помощью регулятора температуры (трансформатора) 14.

В нагревателе воздух достигает заранее заданной температуры и через вентиль 9 сбрасывается в выхлопной патрубок (утилизатор), при этом происходит прогрев соединительной и запорной арматуры до температуры $T_{ТН}$, определяемой по датчику температуры 15.

После нагрева электронагревателя и прогрева соединительной и запорной арматуры компрессор 5 выключается, вентили 2–4, 8–9 закрываются, открывается вентиль 34 и ЭМУ 1 заполняется газом гелием из баллона 18 до заданного давления, определяемого по датчику давления 28.

Осуществляется подача ТН в ЭМУ 1. Для этого открываются вентили 20 и газы из баллонов 22 через ЭПК с датчиками давления 23, редукторы 24 и дроссели 25 поступают в смеситель 26, в котором смешиваются. Количество баллонов 22 зависит от количества компонентов, необходимых для моделирования реального ТН. Необходимое соотношение компонентов задается с помощью редукторов 24 и дросселей 25. Полученный ТН через вентиль 21 поступает в электронагреватель 13. Расход ТН определяется расходомером 17, а температура на входе в ЭМУ 1 датчиком температуры 15.

ТН поступает в ЭМУ 1, датчиками температуры 19 и давления 28 контролируются выходные параметры испаряемой жидкости. С использованием мобильных датчиков температуры 29, скорости потока ТН 30 и влажности воздуха 31 определяются параметры процесса испарения жидкости.

Осуществляется нагрев пластины 33, на которой располагается модельная жидкость до температуры $T_{п}$.

Предохранительный пневмоклапан 32 обеспечивает надежность систем ЭМУ (по величине избыточного давления). По выхлопному трубопроводу газ из ЭМУ поступает в утилизатор.

По результатам проведенных экспериментов строятся графики изменения:

- температур жидкости, стенок ЭМУ, пластины и газа;
- влажности газа;
- скорости потока ТН в различных точках ЭМУ;
- состава продуктов испарения;
- площади массоотдающей поверхности.

С использованием программы Терра определены составы синтезированных ТН для испарения керосина при различных коэффициентах избытка окислителя на основе жидких газогенерирующих составов «керосин + кислород» и «керосин + перекись водорода» (см. табл. I).

ТАБЛИЦА 1
МАССОВЫЙ ПРОЦЕНТНЫЙ СОСТАВ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ТН

№ п/п	Состав модельных газов	Коэффициент избытка окислителя ГГС керосин + кислород			Коэффициент избытка окислителя ГГС керосин + перекись водорода		
		0.15	0.25	0.5	0.3	0.9	1.5
1	H ₂	59.55	53.11	58.21	42.81	53.80	53.04
2	H ₂ O	5.74	1.66	7.28	18.93	8.62	7.34
3	CO	26.48	42.79	24.39	3.55	26.48	36.01
4	CO ₂	2.28	0.82	2.97	3.47	4.3	3.17
5	CH ₄	5.95	1.62	7.15	31.24	6.80	0.44
T, K		1129.9	1271.1	1103.7	967	1091.5	1250

Как следует из приведённых результатов (см. табл. 1), в состав модельных ТН для испарения, например, керосина, входит всего пять основных газов, следовательно, необходимо 5 баллонов с системой регулирования расходов для получения модельного ТН.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На модернизированном экспериментальном стенде возможно получить следующие результаты:

- создание синтезированных ТН путём смешивания газов в соответствии с полученными результатами (см. табл. I) для испарения керосина;

- определение коэффициентов теплоотдачи на элементах конструкции (сухая поверхность) для различных углов натекания ТН;
- определение коэффициентов тепло- и массоотдачи на элементах конструкции для различных параметров ввода ТН и граничного положения модельной жидкости «зеркало», «капля»;
- определение площади массоотдающей поверхности;
- определение концентрации продуктов испарения по времени процесса испарения и т.д.

На рис. 2– 3 приведены результаты экспериментального определения температур системы «газ-жидкость-стенка», коэффициентов теплоотдачи, изменения площади массоотдающей поверхности жидкости для модельного ТН – азот и модельной жидкости – керосин.

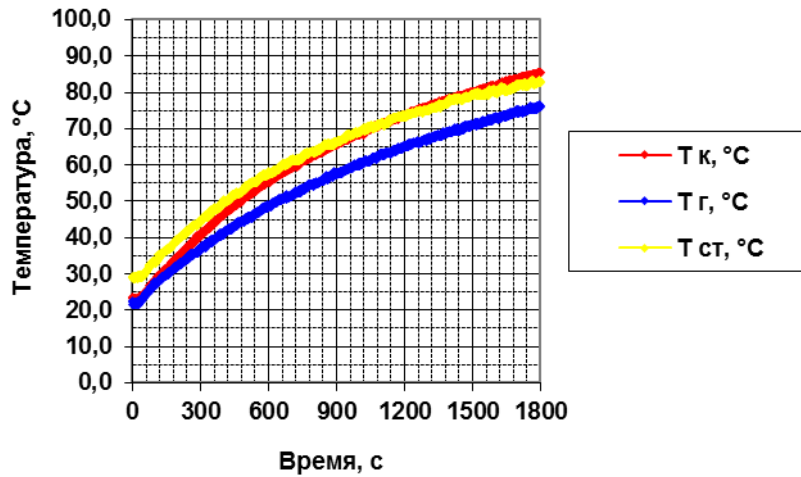


Рис. 2. График изменения температуры керосина (T_k), газа (T_g) и стенки ЭМУ ($T_{ст}$)

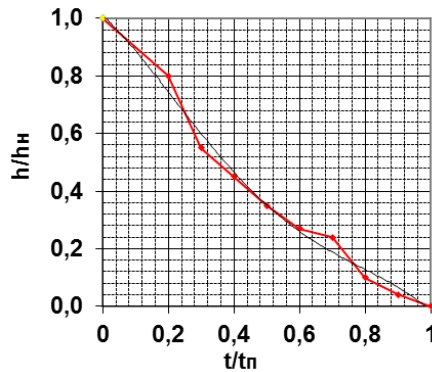


Рис. 3. График изменения уровня керосина на пластине

Изменение уровня керосина $h_k = h/h_H$ на пластине можно записать в виде степенной зависимости:

$$h_k = (-2,2644 \bar{t}^4 + 4,5554 \bar{t}^3 - 2,2939 \bar{t}^2 - 1,0217 \bar{t} + 1,0086) h_H,$$

где h_H – начальный уровень керосина на пластине,

t_H – время, за которое полностью испаряется весь керосин.

Полученные результаты позволили провести предварительные оценки по изменению коэффициентов теплоотдачи [2] при различных скоростях ТН (см. табл. 2).

ТАБЛИЦА 2

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ ГАЗ–ЖИДКОСТЬ, ГАЗ–СТЕНКА ЭМУ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА ТН В ЭМУ И ГРАНИЧНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ КЕРОСИНА НА ПЛАСТИНЕ «ЗЕРКАЛО»

Скорость потока ТН, м/с	Re	Газ–пластина		Газ–керосин «зеркало»	
		Nu	$\alpha_{г-пл}$ Вт/м ² К	Nu	$\alpha_{г-ж}$ Вт/м ² К
8	5.69*10 ⁴	343	44.1	353	45.4
9	6.04*10 ⁴	367	47.2	378	48.6
10	7.11*10 ⁴	390	50.1	402	51.7

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований, можно предложить следующие уточненные формулы по определению коэффициентов теплоотдачи:

$$\text{от газа к пластине: } Nu = 0.05 Re^{0.65} Pr^{0.53},$$

$$\text{от газа к керосину («зеркало»): } Nu = 0.04 Re^{0.8} Pr^{0.53}.$$

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная схема модернизированного экспериментального стенда, а также методика и программа проведения экспериментальных исследований позволит провести необходимые эксперименты по испарению жидкостей, например, керосина или воды при использовании синтезированных ТН на основе смеси газов. Подобраны массовый процентный состав синтезированного ТН при различных коэффициентах избытка окислителя, температура и расход ТН, параметры модельной жидкости и геометрические параметры ЭМУ позволят осуществить моделирование процесса испарение жидкости с обеспечением условий подобия по числам Рейнольдса, Прандтля и Нуссельта. Предварительно проведенные экспериментальные исследования и полученные результаты в виде значений коэффициентов теплоотдачи и критериальных уравнений показали возможность моделирования процесса газификации ракетного топлива и определения затрат энергии на осуществление исследуемого процесса.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны предложения на модернизацию существующего экспериментального стенда, позволяющего проводить экспериментальные исследования процесса испарения жидкости при использовании в качестве ТН смеси газов, с параметрами (теплоёмкость, малярная масса), максимально приближенными к параметрам газа, получаемого на выходе из газогенератора.

2. Разработаны схема модернизированного экспериментального стенда и программа проведения экспериментальных исследований, включающая в свой состав серию подготовительных и основных экспериментов.

3. По результатам предварительно проведенных экспериментальных исследований получены коэффициент теплоотдачи системы «газ–жидкость–стенка» и критериальные уравнения для граничных условий расположения керосина на пластине «зеркало» и ТН – азот.

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор RFMEFI57714X0157.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deluca L., Trushlyakov V. I. [and other]. Active space debris removal by a hybrid propulsion module // Acta Astronautica. 2013. Vol. 91. P. 20–33.
2. Savino R., Monti R. Fluid dynamics experiment sensitivity to accelerations prevailing on microgravity platforms // Phys. Fluids in microgravity. London & N. Y.: Taylor & Francis. 2001. P.515–559.
3. Кузнецов В. В. Тепломассообменная поверхности раздела жидкость–пар // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 5. С.97–107.
4. Kersey J., Loth E., Lankford D. Effect of evaporating droplets on shock waves // AIAA Journal. 2010. Vol.48, no.9. P.1975–1986.

5. Богданов С. Н., Бучко Н. А., Гуйго Э. И. [и др.]. Теоретические основы хладотехники. Теплообмен. М.: Агропромиздат 1986. 320 с.
6. Chikulaev D.G., Shvarts K.G. Effect of rotation on the stability of advective flow in a horizontal liquid layer with solid boundaries at small Prandtl numbers // Fluid Dynamics. 2015. Vol. 50, no. 2. P. 215–222.
7. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Modeling of the flow structure and heat transfer in a gas-droplet turbulent boundary layer // Fluid Dynamics. 2012. Vol. 47, no. 2. P. 168–177.
8. Ovcharova A.S. Droplet formation in the rupture of a liquid film under the action of a thermal load // Fluid Dynamics. 2011. Vol. 46, no.1. P. 108–114.
9. Zuzgirt A.V., Puytin G. F., Ivanova N. G. [et al]. The heat convection of near critical fluid in the controlled microacceleration field under zero-gravity condition // Adv. Space Research. 2003. Vol. 32, no. 2. P. 205–210.
10. Trushlyakov V., Lavruk S. Theoretical and experimental investigations of interaction of hot gases with liquid in closed volume // Acta Astronautica. 2015. Vol. 109. P. 241–247.
11. Trushlyakov V.I., Kudentsov V.Yu., Lesnyak I.Yu., Lempert D.B., Zarko V.E. The modeling of unused propellant residues processes from a tank of rocket stage // Proceedings of the 56th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences. Tel-Aviv & Haifa. Israel, 2016.
12. Пат. №2561427 Российская федерация, МПК G 09 В. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого ракетного топлива и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Лаврук С. А., Лесняк И. Ю. № 2014109613/11; заявл. 12.03.14; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24. 7 с.: ил.

УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПРУГОЙ МУФТЫ В СОСТАВЕ СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА

В. Г. Цысс, И. М. Строков, М. Ю. Сергаева

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Цель работы заключается в расчетном анализе упругой муфты судового валопровода на воздействие крутильных колебаний. Ставится задача на основе применения современных пакетов конечно-элементного моделирования, в частности, Simens NX, определить:

- а) резонансные частоты валопровода;
- б) передаточные характеристики валопровода;
- в) максимальные напряжения и деформации элементов валопровода на резонансных частотах.

В результате проведенных исследований выполнен анализ крутильных колебаний судового валопровода с упругой муфтой, в результате которого определены собственные крутильные частоты, амплитудно-частотные характеристики и коэффициент передачи, формы колебаний и напряжения в элементах судового валопровода на критических частотах.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение современных программных средств конечно-элементного анализа позволяет с достаточной степенью точности существенно ускорить решение поставленных задач.

Ключевые слова: упругая муфта, крутильные колебания, валопровод.

1. ВВЕДЕНИЕ

Упругие муфты применяются в судовых валопроводах дизель-генераторных установок либо приводах гребных винтов на морских судах. Работа дизельного двигателя сопровождается высоким уровнем шума, вибрацией и различными динамическими нагрузками. К таким динамическим нагрузкам относятся крутильные колебания на валу, возникающие в процессе работы дизельного двигателя. Именно эти «неравномерности» и призвана погасить упругая муфта. Известно, что главное назначение упругих муфт заключается в защите привода от недопустимых крутильных колебаний на всех режимах их использования. При этом задача сводится к правильному обоснованию такой динамической жесткости муфты, при которой наиболее опасные резонансы свободных колебаний не попали бы в рабочий диапазон частоты ее вращения. С этой целью проводится динамический анализ судового валопровода, призванный исключить нежелательные резонансные явления.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы заключается в расчетном анализе упругой муфты судового валопровода на воздействие крутильных колебаний. Ставится задача на основе применения современных пакетов конечно-элементного моделирования, в частности, Simens NX определить:

- а) резонансные частоты валопровода;
- б) передаточные характеристики валопровода;
- в) максимальные напряжения и деформации элементов валопровода на резонансных частотах.

Объектом исследования является упругая муфта в системе судового валопровода. Для проведения динамических расчетов была принята схема с двумя жесткими валами, соединенными между собой эластичной муфтой. На конце одного из валов прикреплен массивный диск, имитирующий гребной винт (рис. 1).

III. ТЕОРИЯ

В настоящее время существуют аналитические методы расчета крутильных колебаний, подробно изложенные в работах [1, 2, 3].

Данные методы базируются на составлении крутильной схемы, которая представляет собой упрощенную дискретную модель судового валопровода в виде набора инерционных звеньев, соединенных последовательно звеньями, имеющими определенную жесткость (податливость). Эти методы достаточно трудоемки, так как используют ручные вычисления и не приспособлены для машинного счета. Попытка несколько адаптировать такой подход к машинному счету предпринята в работе [1], используя для вычислительных операций прикладные математические пакеты программ, такие как MS Excel и MathCad.

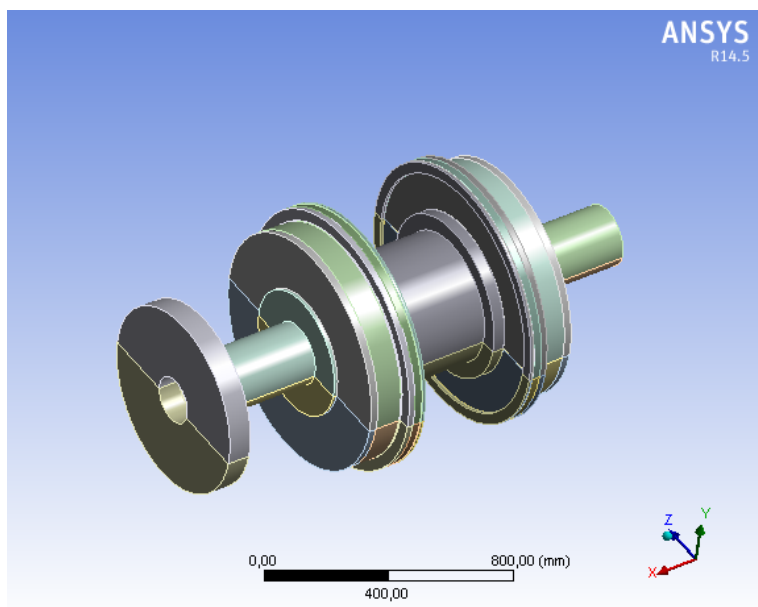


Рис. 1. 3D-модель судового валопровода

В настоящей работе предпринята попытка применения для расчета крутильных колебаний современных пакетов конечно-элементного моделирования, в частности, Simens NX.

Проанализируем основные этапы расчета крутильных колебаний на предмет применимости к ним метода конечных элементов [4, 5, 6].

1. Расчет компонентов крутильной схемы.

На данном этапе валопровод делится на элементарные звенья – инерционные и упругие, для которых вычисляются моменты инерции и податливости (жесткости). Так же принимаются определенные коэффициенты демпфирования.

При использовании метода конечных элементов данные характеристики вычисляются программой автоматически на основе задания геометрических параметров валопровода, характеристик материалов (масса, упругие характеристики, коэффициенты демпфирования материала), коэффициенты конструкционного демпфирования.

2. Гармонический анализ возмущающих моментов.

На данном этапе вычисляется диаграмма распределения возмущающих моментов в зависимости от частоты. Данная диаграмма используется в качестве нагрузки при расчете амплитуд вынужденных колебаний.

Приведенные на этом этапе вычисления необходимо провести и для конечно-элементного анализа.

3. Определение крутильных схем.

Определение крутильной схемы валопровода объединением элементов вычисленных на первом этапе. Для расчета методом конечных элементов данный этап выполняется заданием геометрических параметров и характеристик материалов на первом этапе. Следует отметить, что при решении методом конечных элементов валопровод разбивается на гораздо большее число дискретных элементов, каждый из которых обладает полным набором характеристик – как моментом инерции, так и жесткостью (податливостью). Поэтому параметры конечно-элементной модели более приближены к реальным характеристикам валопровода, что способствует более точному решению.

4. Расчет свободных колебаний.

На данном этапе определяются частоты и формы свободных колебаний валопровода путем составления частотных уравнений и поиска корней предложенными методами. Расчет разделен на два этапа:

а) расчет частот свободных колебаний;

б) расчет форм свободных колебаний – определяется распределение амплитуд по массам системы.

Так же на втором этапе определяются относительные напряжения на упругих элементах, которые затем используются для расчета резонансных напряжений.

При расчете методом конечных элементов для данного этапа проводится модальный анализ. Модальный анализ позволяет определить собственные частоты и формы колебаний, а так же относительные амплитуды перемещений и напряжений для последующих расчетов.

Дифференциальное уравнение свободных механических колебаний, используемое для модального анализа методом конечных элементов можно записать следующим образом [7]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0,$$

где $[M]$ – матрица масс; $[K]$ – матрица жесткости; $\{x\}, \{\ddot{x}\}$ – векторы узловых перемещений и ускорений, соответственно.

5. Векторный анализ свободных колебаний.

Анализ проводится с целью выявления наиболее значимых частот и форм колебаний и исключения незначительных. Так же проводится анализ влияния отключения некоторых цилиндров двигателя на картину крутильных колебаний судового валопровода.

При конечно-элементном анализе данный этап не имеет смысла, так как по результатам расчета легко оценить качественные и количественные показатели гармоник. Влияние же отключения цилиндров на данном этапе методом конечных элементов оценить невозможно.

6. Расчет резонансных вынужденных колебаний.

Выполняется для определения напряжений и эластических моментов при действии нагрузки в виде переменного крутящего момента с резонансной и не резонансной частотой и оценки их по действующим правилам Российского морского регистра.

Эквивалентом данного расчета в методе конечных элементов служит анализ гармонического отклика NX Response Simulation. Результатом данного анализа является отклик валопровода на гармоническое воздействие переменного крутящего момента, т.е. амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) в любой точке, напряжения и деформации элементов валопровода.

В данном случае системой решается дифференциальное уравнение колебаний вида:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = F(t),$$

где $[M]$ – матрица масс; $[C]$ – матрица коэффициентов демпфирования; $[K]$ – матрица жесткости; $\{x\}, \{\dot{x}\}, \{\ddot{x}\}$ – векторы узловых перемещений и ускорений соответственно; $F(t)$ – вынуждающая сила.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Этап 1. Моделирование

Для создания конечно-элементной модели выполняем:

а) создаем трехмерную геометрическую модель, изображенную на рис. 1.

б) зададим характеристики материалов: упругие элементы выполнены из резины, а остальные из обычной конструкционной стали из базы данных NX [8, 9]. Характеристики выбранных материалов приведены (см. табл. 1).

ТАБЛИЦА 1
ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ УПРУГОЙ МУФТЫ

Материал муфты	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Плотность ρ , кг/м ³
Резина	6,0	0,49	1200
Сталь конструкционная	$2 \cdot 10^5$	0,3	7800

в) на базе геометрической модели создадим трехмерную конечно-элементную модель. Модель состоит из 88154 элементов и 246586 узлов. Конечно-элементная модель приведена на рис. 2.

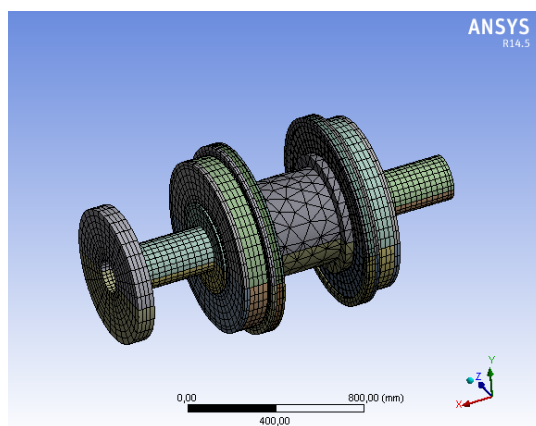


Рис. 2. Трехмерная конечно-элементная модель

Детали валопровода и муфты соединены между собой при помощи инструмента моделирования «Склейка».

Этап 2. Гармонический анализ

Для нахождения собственных частот и форм колебаний валопровода воспользуемся решением SEMODES 103 – Response Simulation:

а) закрепим все степени свободы, кроме вращения вокруг оси Ox , для того, чтобы исключить из расчета моды, не соответствующие крутильным колебаниям. Для этого применим инструмент Cylindrical Support к цилиндрическим поверхностям, закрепив (Fixed) радиальные (Radial), осевые (Axial) перемещения, освободив (Free) только тангенциальные (Tangential);

б) зафиксируем все степени свободы на конце вала, идущего к силовому агрегату, при помощи инструмента Fixed Support;

в) после проведения расчета получим две собственные частоты $F_1 = 16$ Гц (рис. 3), $F_2 = 40$ Гц (рис. 4). На первой частоте весь вал вместе с большей частью муфты поворачивается целиком относительно первичного вала (закреплен) и наибольшей деформации подвергается упругий элемент, расположенный ближе к первичному валу.

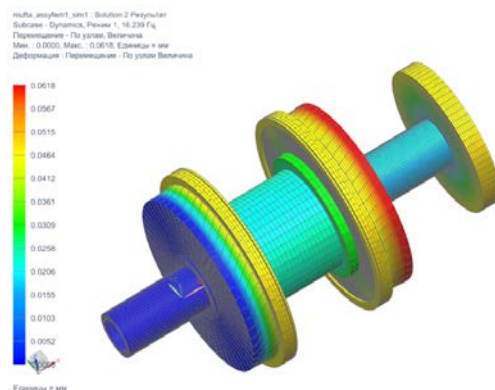


Рис. 3. Первая форма собственных колебаний $F_1 = 16$ Гц

На второй собственной частоте промежуточный и вторичный валы вращаются в разные стороны и наибольшей деформации подвергается упругий элемент, расположенный ближе к вторичному валу.

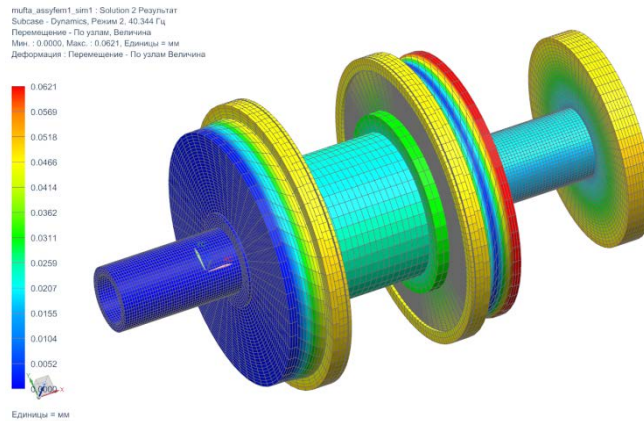


Рис. 4. Вторая форма собственных колебаний $F_2 = 40$ Гц

В табл. 2 приведено распределение модальных эффективных масс.

ТАБЛИЦА 2
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОДАЛЬНЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ МАСС

№ моды	Частота, Гц	Перемещение по X	Перемещение по Y	Перемещение по Z	Вращение RX	Вращение RY	Вращение RZ
1	16	$3,2 \cdot 10^{-14}$	$8,6 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
2	40	$8,7 \cdot 10^{-13}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$

Из табл. 2 можно сделать вывод, что наибольший вклад массы приходится на вращательную степень свободы.

Этап 3. Расчет вынужденных колебаний.

После определения собственных форм и частот колебаний становится возможным нахождение отклика конструкции на гармоническое воздействие [10, 11].

Так как в расчете отсутствует возможность задания динамической нагрузки в виде момента (имеется возможность задания перемещения, скорости или ускорения), то будем прикладывать его косвенно – выразив через перемещения или ускорения.

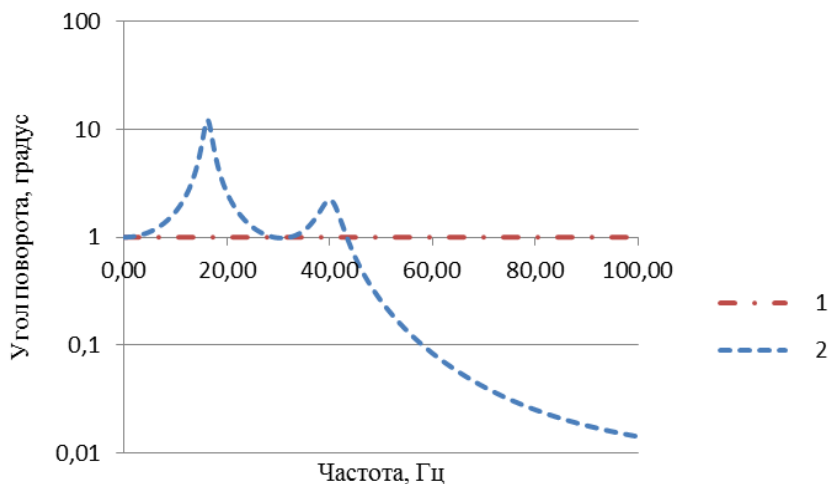


Рис. 3. Амплитуды перемещений:
1 – на входе; 2 – на выходе

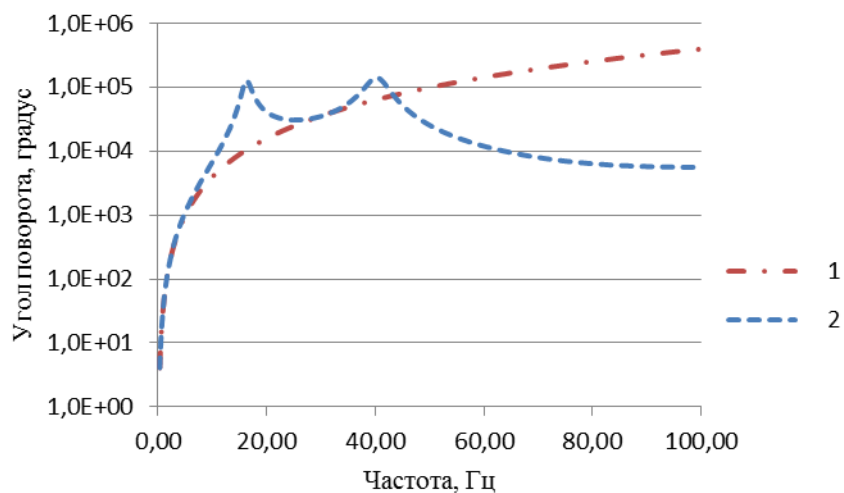


Рис. 4. Амплитуды ускорений:
1 – на входе; 2 – на выходе

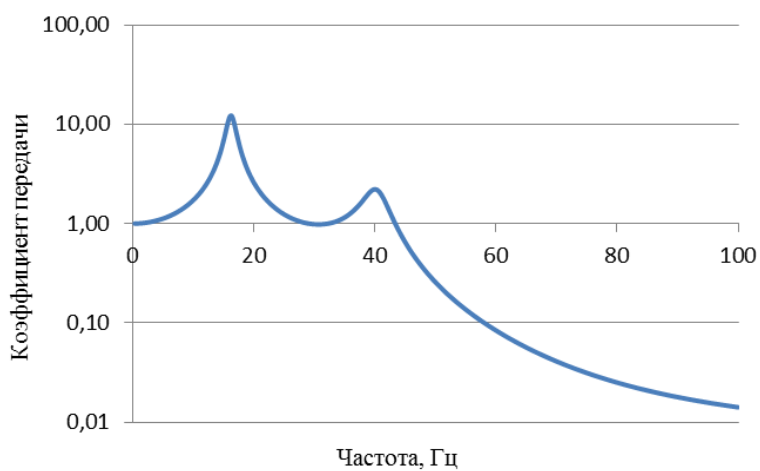


Рис. 5. Коэффициент передачи по перемещениям

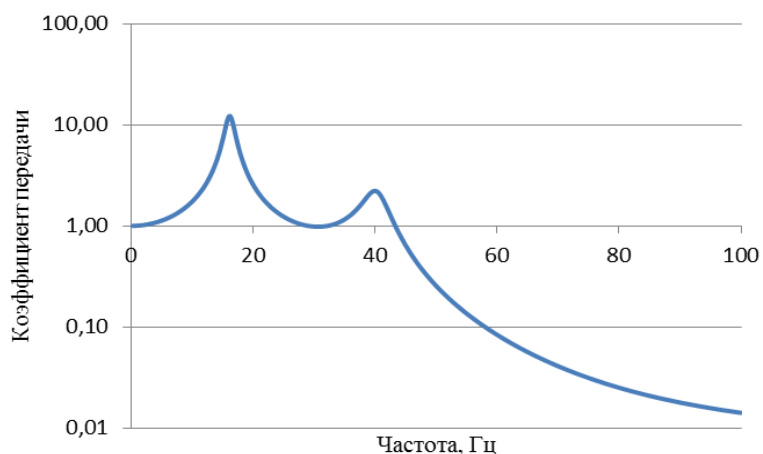


Рис. 6. Коэффициент передачи по ускорениям

Проведя статический расчет, получим, что для поворота на один градус нужно приложить момент, равный 6,6 кНм:

а) на конце вала, где в расчете на собственные частоты были ограничены перемещения, зададим вынуждающее смещение в 1 градус;

- б) зададим общий коэффициент демпфирования для всей конструкции, равный 0,05 от критического;
 - в) после расчета сравним угловые перемещения на одном и на другом конце вала (рис. 5), а так же амплитуды ускорений (рис. 6). На графиках видны два резонансных пика на частотах 16 Гц и 40 Гц;
 - г) разделив выходную функцию перемещения на входную, получим коэффициент передачи (рис. 7). То же выполним и для ускорений (рис. 8). Из графиков (рис. 7 и 8) видно, что коэффициент передачи в зоне резонансов выше единицы, а за зоной резонанса значительно уменьшается;
 - д) далее вычислим напряжения в валопроводе на резонансных частотах. Эпюры полученных напряжений изображены на рис. 9 и 10.
- На рис. 11 приведен график изменения напряжений в зависимости от частоты на наиболее напряженном участке валопровода.

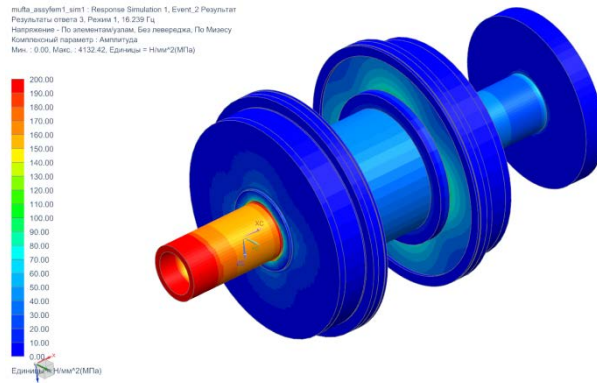


Рис. 7. Напряжения при резонансе на частоте 16 Гц

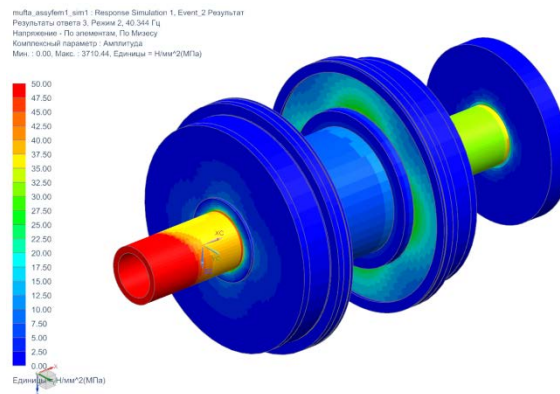


Рис. 8. Напряжения при резонансе на частоте 40 Гц

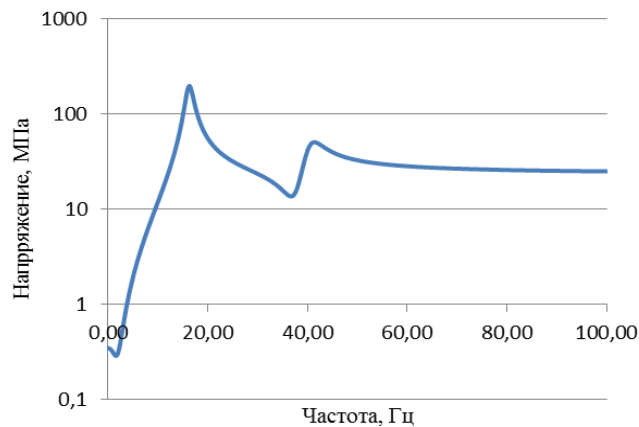


Рис. 9. Напряжения в элементе

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенных исследований получено, что самым напряженным является участок валопровода, расположенный вблизи источника колебаний и чем дальше от источника колебаний, тем напряжения становятся меньше. Коэффициент передачи, как следует из рис. 7 и 8, в зоне резонансов выше единицы, а за зоной резонанса значительно уменьшается. Изменение напряжений в зависимости от частоты на наиболее напряженном участке валопровода показано на рис. 11.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выполнен анализ крутильных колебаний судового валопровода с упругой муфтой, в результате которого определены:

- собственные крутильные частоты;
- амплитудно-частотные характеристики и коэффициент передачи;
- формы колебаний и напряжения в элементах судового валопровода на критических частотах.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение современных программных средств конечно-элементного анализа позволяет с достаточной степенью точности существенно ускорить решение поставленных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов Л. В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. СПб.: Наука, 2007. 276 с.
2. Терских В. П. Крутильные колебания валопроводов силовых установок. Л.: Судостроение, 1969. Т. 1.
3. Mancuso Jon R. Couplings and joints. Design, selection, and application // 7th ed.: revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc, 1999. 581 p.
4. Alex B. Francis. Experimental, Numerical and Analytical Characterization of Torsional Disk Coupling Systems // Theses and Dissertations. 2014. P. 625.
5. Reddy J. N. An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis. USA: Oxford University Press, 2004.
6. Logan D. L. A First Course in the Finite Element Method. 5th ed. USA: Cengage Learning, 2012.
7. Гончаров П. С. [и др.]. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. М.: ДМК Пресс, 2012. 504 с.
8. Tsyss V. G., Stokov I. M., Sergaeva M. Yu. The issues of life extension of seismic isolation system of circular tanks for storage of liquefied petroleum gas // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 395–401.
9. Tsyss V. G., Stokov I. M., Sergaeva Yu M. Dampener resource of seismic isolation absorber system of circular tanks for liquid hydrocarbons storage // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 402–407.
10. Byrtus M. Dynamic Analysis of Reduced Order Large Rotating Vibro-Impact Systems // Int. J. Mech., Ind. Sci. Eng. 2013. Vol. 7, no. 11. P. 1263–1270.
11. Burkardt J., Q. DuGunzburger M., Lee H. C. Reduced order modeling of complex systems in NA03 // Dundee. 2003. P. 29–38.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. ЭЛЕКТРОНИКА.

УДК 621.317.3

БОРТОВАЯ МИКРОВОЛНОВАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ВЫСОКОЙ ДИНАМИКОЙ ИЗМЕРЕНИЯ

*Т. Абдирасул уулу, Е. В. Алексеев, Д. Н. Данилов, Г. Г. Жук, А. С. Ташходжаев,
А. В. Убайчин, А. В. Филатов*

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
СКБ «Смена», г. Томск, Россия*

Аннотация – В статье описан новый метод проектирования нулевых микроволновых радиометров с высокой динамикой измерений, стабильностью и пониженным энергопотреблением. Раскрыты аспекты оригинального способа формирования опорного источника низкотемпературного шума, алгоритма управления и условия нулевого баланса мощности измеряемых сигналов в модифицированных нулевых радиометрах. Приведена разработанная структурная схема радиометрической системы, предназначенной для поиска радиотепловых аномалий подстилающей поверхности с помощью автономного беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, микроволновый радиометр, радиофизические методы исследований, научное приборостроение, поиск радиотепловых аномалий.

И. ВВЕДЕНИЕ

Радиометрические методы получили широкое распространение в различных прикладных отраслях народного хозяйства. Неотъемлемой частью радиометрических измерений является специализированная измерительная аппаратура, характеристики которой определяют метрологический уровень полученных данных. В настоящее время с достаточной глубиной решен вопрос разработки и создания стационарных радиометрических систем, основанных на классических измерительных методах [1]. Все большей актуальностью начинают обладать задачи применения микроволновых радиометров в составе летательных аппаратов и других подвижных объектов с автономным питанием [2]. Актуальность применения таких систем микроволновой радиометрии обусловлена необходимостью реализации перспективных прикладных задач, заключающихся, в том числе, в мониторинге подстилающей поверхности на предмет поиска «холодных» и «горячих» радиотепловых аномалий, обусловленных, например, возгораниями или скрытыми металлическими объектами.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ключевой особенностью автономных измерительных систем является ограниченная емкость элементов питания. Ввиду необходимости обеспечения тщательного термоститирования и питания систем контроля усиления существующие микроволновые радиометрические системы обладают повышенным потреблением энергетической энергии. В связи с этим актуальна задача разработки новых методологических решений, позволяющих создавать радиометрические системы с низким энергопотреблением и высокими метрологическими характеристиками.

Нашим коллективом разработана микроволновая радиометрическая система коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн для поиска радиотепловых аномалий с борта автономного беспилотного летательного аппарата. Радиометрическая система характеризуется низким энергопотреблением, высокой стабильностью и динамикой измерений, присущей нулевым радиометрам.

III. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В основе радиометрической системы заложены принцип многоприемниковости, модификации нулевого метода измерений и оригинальное техническое решение [2]. Структурные схемы автономной радиометрической системы и двухприемникового радиометра показаны на рис. 1.

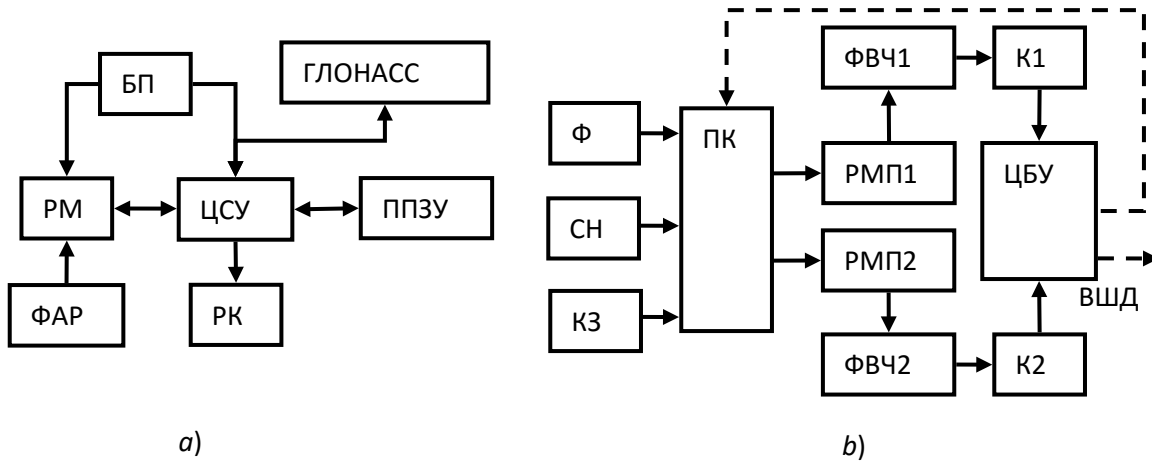


Рис. 1. Структурные схемы автономной радиометрической системы а) и двухприемникового нулевого радиометра б)

Радиометрическая система состоит из фазированной антенной решетки ФАР, микроволнового радиометра РМ, цифровой системы управления ЦСУ, программируемого постоянного запоминающего устройства ППЗУ, блока передачи данных по радиоканалу РК, автономного блока питания БП, блока глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС.

На рис. 1б изображена структурная схема двухприемникового микроволнового радиометра с пониженным энергопотреблением. Радиометр состоит из антенного фидера Φ , выход которой подключен к соответствующему входу сверхвысокочастотного переключателя ПК, соответствующие входы которого подключены к согласованной нагрузке СН и сверхвысокочастотному короткозамыкателю КЗ, при этом первый выход переключателя соединен с первым входом цифрового блока управления ЦБУ через последовательно соединенные первый радиометрический приемник РМП1, первый фильтр высоких частот ФВЧ1 и первый компаратор К1, а второй выход переключателя соединен со вторым входом цифрового блока управления ЦБУ через последовательно соединенные второй радиометрический приемник РМП2, второй фильтр высоких частот ФВЧ2 и второй компаратор К2, цифровой блок управления имеет одну цифровую управляющую шину данных, соединяющую соответствующий выход ЦБУ с управляющим входом ПК, а вторая цифровая шина ЦБУ является выходной шиной радиометра ВШД.

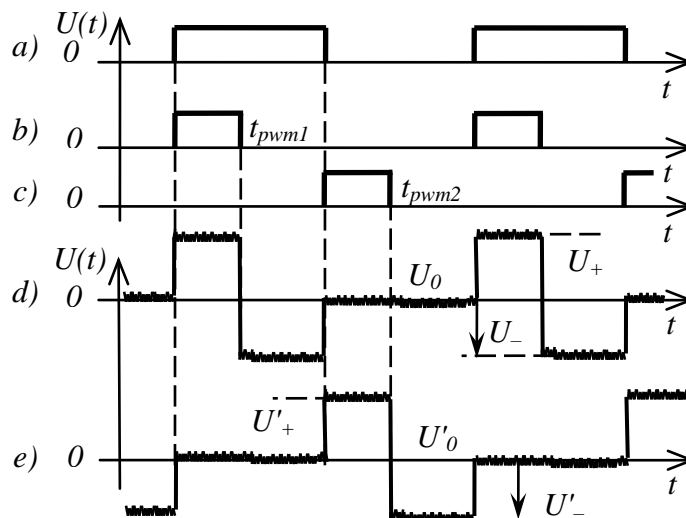


Рис. 2. Временные диаграммы работы разработанного радиометра

Функционирование радиометра происходит согласно временным диаграммам, представленным на рис. 2 и осуществляется следующим образом. Работа радиометра выполняется синхронно с тремя управляющими логическими сигналами t_{ram} (Рис. 2 а), t_{pwm1} (рис. 2 б), t_{pwm2} (рис. 2 в) генерируемыми в ЦБУ. Под действием управляющего сигнала t_{ram} посредством высокочастотного переключателя происходит поочередное переключение

ФАР на входы первого и второго радиометрических приемников. Высокий уровень сигнала t_{pam} соответствует подключению ФАР на вход второго радиометрического приемника, низкий уровень соответствует подключению ФАР на вход первого радиометрического приемника. Высокий уровень управляющих сигналов t_{pwm1} и t_{pwm2} управляют подключением согласованной нагрузки на вход первого и второго радиометрических приемников соответственно.

Во время низкого уровня сигнала t_{pwm1} и высокого уровня сигнала t_{pam} на вход первого радиометрического приемника подключается высокочастотный короткозамыкатель. Во время низкого уровня сигнала t_{pwm2} и низкого уровня сигнала t_{pam} высокочастотный короткозамыкатель подключается на вход второго радиометрического приемника. На рис. 2 диаграммы d и e соответствуют эпюрам напряжения на входе первого и второго компараторов соответственно.

IV. АЛГОРИТМ РАБОТЫ РАДИОМЕТРА И МОДЕЛИРОВАНИЕ

При помощи САПР NI AWR Microwave Office проведено моделирование алгоритма работы разработанного радиометра. Алгоритм работы состоит в следующем. Пусть согласованная нагрузка обладает шумовой температурой T_{ML} , шумовая температура первого радиометрического приемника соответствует T_{NR1} , а шумовая температура фазированной антенной решетки равна T_A . Амплитуды положительного и отрицательного импульсов (рис. 3 d) U_+ , U_- и уровня напряжения, пропорционального подключению на вход приемника фазированной антенной решетки U_0 соответственно равны

$$U_+ \approx k\Delta f_1 G_1 (T_{ML} + T_{NR1}), U_- \approx k\Delta f_1 G_1 (T_{NR1}), U_0 \approx k\Delta f_1 G_1 (T_{NR1} + T_A) \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, Δf_1 – рабочая полоса частот первого радиометрического приемника, G_1 – коэффициент передачи первого радиометрического приемника.

Выполнение условия (2) обуславливает равенство вольт-секундных площадей [3]:

$$(U_0 - U_-) \cdot (t_{pam} - t_{pwm1}) = (U_+ - U_0) \cdot t_{pwm1} \quad (2)$$

Технически выполнение условия (2) достигается за счет измерения длительности широтно-импульсной модуляции, при этом компаратор производит непрерывное слежение за напряжением в полупериоде амплитудно-импульсной модуляции, соответствующим подключению на вход радиометрического приемника фазированной антенной решетки. Фиксация нулевого напряжения соответствует выполнению условия (4) при исключенной постоянной составляющей протектированной импульсной последовательности [3] при помощи фильтра высоких частот.

Подставляя выражения (1) в (2), путем деления левой и правой части на общий множитель $k\Delta f_1 G_1$, вычитания T_{NR1} и преобразовывая относительно T_A

$$T_A = T_{ML} \cdot t_{pwm1} / t_{pam} \quad (3)$$

Формула (3) показывает инвариантность результатов измерений к изменениям коэффициента передачи приемника и собственной шумовой температуры.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработан новый способ реализации модификации нулевого метода измерений и концепции многоприемниковости. Разработанный на основе оригинального способа модифицированный двухприемниковый микроволновый радиометр использует собственную шумовую температуру радиометрического приемника и согласованную нагрузку в качестве опорных точек для построения передаточной характеристики. Приведенная особенность позволяет избежать применения опорного генератора шума на основе лавинно-пролетных диодов и диодов Ганна. По сравнению со структурной схемой, приведенной в [3], конструкция разработанного радиометра упрощена за счет исключения направленного ответвителя, генератора шума, управляющего СВЧ-ключа.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований снижено энергопотребление и улучшены массогабаритные параметры бортовой радиометрической системы. В разработанном радиометре нет необходимости термостатирования радиометрического приемника при измерении температуры согласованной нагрузки и коррекции результатов измерений. Формирование опорного источника шумового сигнала посредством переотражения собственных шумов системы связано с рядом особенностей, описанных в [2].

В приведенной структурной схеме данные особенности, связанные с интерференцией собственных шумов также имеют место. Способ их устранения в модификации нулевого метода измерений охраняется авторами в режиме «ноу-хау».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00237мол_а

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Camps A., Tarongi J. M. Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times // Remote Sensing. 2010. Vol. 2. P. 1826–1843.
2. Filatov A.V., Ubaichin A.V. A microwave four-channel null L-band radiometer // Instruments and Experimental Techniques. 2012. Vol. 55, no. 1. P. 59–64.
3. Filatov A.V., Ubaichin A.V. The dynamic properties of a digital radiometer system and its operating efficiency // Measurement Techniques. Vol. 12, no. 10. P. 1–6.
4. Ubaichin A.V., Filatov A.V. Quick event registration by a microwave radiometric method // Proceeding CriMiCo. 2014. P. 1123–1124.

УДК 004.4:378.16

СИСТЕМА ПРОВЕРКИ БЛАНКОВ ТЕСТИРОВАНИЯ

А. А. Вальке, О. Н. Кучеренко, М. С. Кузьяев

Омский государственный технический университет. г. Омск, Россия

Аннотация – Статья описывает систему автоматизированной проверки бланков тестирования по различным дисциплинам. Разработанная система позволяет автоматизировать проверку бланков тестирования по различным дисциплинам. В статье рассматривается схема базы данных, предназначенная для хранения результатов тестирования за несколько лет. Показано взаимодействие разработанного программного обеспечения со сторонними приложениями. Отображены возможности системы и область ее применения.

Ключевые слова: тестирование, бланк, автоматизация.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение получают различные виды тестирования. В виде тестирования учащиеся сдают единый государственный экзамен (ЕГЭ), государственную итоговую аттестацию (ГИА), различные тесты можно применять при контроле знаний абитуриентов и студентов в вузах и сузах. Основной проблемой при тестировании большого количества учащихся является проверка тестов, то есть подсчет количества правильных ответов в тесте. Одним из способов решения этой проблемы является проведения тестов на компьютерах при помощи специализированного программного обеспечения [1]. При этом возникает проблема установки большого количества компьютеров в одну аудиторию, а при использовании нескольких аудиторий возникает необходимость привлечения большого количества наблюдателей. Поэтому, несмотря на широкое распространение программного обеспечения проведения тестирования, до сих пор используется тестирование в виде заполнения специальных бланков ответов. Такое тестирование позволяет использовать для массового тестирования лекционные аудитории большой вместимости без установки специализированного оборудования.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При проведении тестирования с помощью специальных бланков ответов возникают две основные проблемы. Первая проблема заключается в проверке бланков ответов, а вторая в формировании ведомости сдачи тестов. Наиболее оптимальным вариантом решения этих проблем представляется использование компьютера. Кроме того, при формировании ведомости с использованием компьютера имеется возможность записи в базу данных результатов тестирования с последующим формированием статистики сдачи тестов.

Для использования компьютера при проверке тестов и формировании ведомости, необходимо данные с бумажного бланка ответа перевести в электронную форму с помощью специального программного обеспечения. Такое программное обеспечение должно решать следующие задачи:

- ввод ключей;
- перевод бланков ответов с бумажного носителя в электронную форму;
- распознавание бланков ответов;

- проверка правильности распознавания бланков ответов;
- подсчет количества правильных ответов и выставление оценки;
- запись результатов в базу данных;
- формирование ведомости результатов тестирования.

III. ТЕОРИЯ

Ключ представляет собой тестовый бланк (ключевой бланк) с правильными ответами. Ввод ключа можно осуществлять несколькими способами. Один из способов ввода ключа является сканирование ключевого бланка, его распознавание и ввод правильных ответов в базу данных. Недостатком этого способа является необходимость сканирования и распознавание ключевых бланков, что занимает значительное время и может привести к ошибкам в ключе. Вторым способом ввода ключа является ввод правильных ответов непосредственно в базу данных. Этот способ позволяет ускорить ввод ключа и уменьшить вероятность ошибки, но он требует специального программного обеспечения для создания тестов.

Перевод бланков ответов с бумажного носителя в электронную форму осуществляется путем сканирования бланков ответов.

Распознавание бланков ответов и проверка правильности распознавания является наиболее трудоемкой и наиболее ответственной частью программного обеспечения. На сегодняшний день имеется множество отдельных программ и программных комплексов, позволяющих распознавать текстовую информацию.

Выделяют два вида таких систем: OCR (Optical Character Recognition) и ICR (Intelligent Character Recognition)[2].

Основное назначение таких систем – автоматизация процесса ввода в компьютер типографских, машинописных, рукописных текстов. Данные системы содержат разнообразные средства, облегчающие работу пользователя и повышающие вероятность правильного распознавания.

К наиболее распространенным OCR-системам относятся: ABBYY FineReader, CuneiForm, OmniPage Professional.

Технология работы таких систем заключается в следующем: в процессе анализа на изображении выделяются блоки (текст, таблица, рисунок); блоки подразделяются на более мелкие объекты (строки, слова, символы), которые затем обрабатываются и распознаются; на основе распознанных символов создается аналог исходного документа.

К ICR-системам относятся такие продукты, как ABBYY FormReader, система потокового ввода данных и обработки документов ABBYY FlexiCapture и другие.

Основное назначение пакетов этого вида – обработка форм. Формой называется документ, который имеет фиксированную структуру и предназначен для сбора определенной информации (бланки, анкеты и т. п.). На изображении выделяются смысловые области, которые затем подвергаются обработке. Система не строит исходный документ, а извлекает информацию из областей и передает на хранение [2].

При разработке системы были проанализированы различные OCR- и ICR-системы и была выбрана ICR-система ABBYY FormReader. Эта система позволяет распознавать рукописный текст, передавать данные в базу данных и многое другое.

Проверка правильности ответов осуществляется путем сравнения полей ответов тестового бланка с полями ответов ключевого бланка. После подсчета количества правильных ответов формируется ведомость сдачи тестов.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Программа разрабатывалась на языке Borland C++ Builder.

На рис. 1. приведена схема базы данных, используемой программным обеспечением. База данных разработана на основе СУБД MS Access.

Первой таблицей является таблица FIO с данными абитуриентов, в которой хранятся такие данные, как их порядковый номер, ФИО, номер и серия паспорта, пол, а также аудитория проведения экзамена, факультет и др. Первая таблица связана с таблицами второй ОТВ и пятой RES по полю порядкового номера абитуриента «NUM».

Вторая таблица ОТВ содержит в себе порядковый номер абитуриента, код, название и номер сдаваемого предмета, дату проведения экзамена, а также все ответы, отмеченные абитуриентом в ходе сдачи экзамена.

Третья таблица KEY по структуре совпадает со второй таблицей ОТВ и связана с ней по полям кода и номера теста и является образцом, содержащим правильные ответы на все тесты всех экзаменов.

Четвертая таблица BALL содержит столбцы код предмета, первичный и итоговый балл. Данная таблица содержит данные о том, сколько итоговых баллов необходимо присудить абитуриенту за дачу определенного количества правильных ответов на каждый тест.

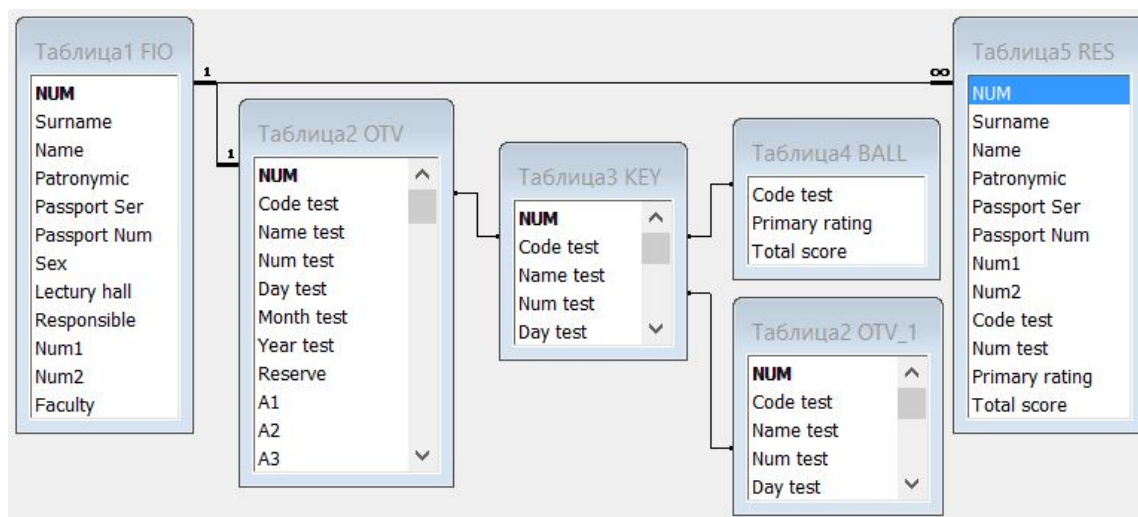


Рис. 1. Схема базы данных

Пятая таблица RES является итоговой и содержит в себе столбцы порядкового номера абитуриента, его ФИО, серию и номер паспорта, код и номер сданного теста, а также первичный и вторичный балл. Данная таблица связана в самой структуре базы данных с первой таблицей полем NUM. Также пятая таблица связана со второй таблицей OTV и третьей таблицей KEY по алгоритмам, прописанным в самой программе, по которым происходит сравнение правильных ответов таблицы KEY и данных абитуриентом ответов в таблице NUM и занесение количества правильных ответов в поле первичного балла.

Работа программы начинается с пакетного сканирования форм с ответами абитуриентов. Для сканирования запускается программа АБВУУ FormReader и используется ее функция пакетного сканирования документов, которая вносит все отсканированные формы в пакет форм, в котором они будут храниться в дальнейшем.

Вторым этапом является распознавание и корректировка ответов. На этом этапе используется та же программа, что и на первом этапе, но уже идет распознавание ответов и занесение их в базу данных. Все спорные места, которые программа не может самостоятельно распознать, выводятся оператору, который сам должен поправить данные.

Затем запускается алгоритм программы, который сравнивает совпадающие по колонкам «Codetest» и «Numtest» записи таблицы OTV с ответами абитуриентов и записи таблицы KEY с правильными ответами. Алгоритм подсчитывает количество совпавших ответов и записывает результат в таблицу RES, из которой в конце работы программы выводится итоговая ведомость.

Распознавание и корректировка паспортных данных производится также с помощью программы АБВУУ FormReader. Данные считываются программой и заносятся в первую таблицу FIO базы данных. Отдельная таблица нужна для сохранения конфиденциальности информации о том, кто сдавал конкретный тест. Таким образом, для оператора исключается возможность исправить ответы конкретного абитуриента. Связь между таблицами осуществляется при помощи ключевого поля «NUM».

После ввода в базу данных паспортной информации создается итоговая ведомость, которая записывается в пятую таблицу RES. В ведомость выводится вся необходимая информация: ФИО абитуриента, серия и номер паспорта, код и номер теста, а также количество правильных ответов и итоговый балл. Вывод итоговой ведомости является финальной стадией работы программы, которая делает заключение о проделанной абитуриентами работе.

Ввод ключей осуществляется отдельной подпрограммой и производится до проверки тестов.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная система предназначена для автоматизированной проверки бланков ответов при проведении экзаменов в форме тестирования, при текущем контроле знаний, при вступительных испытаниях и т.п.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система проверки бланков тестирования позволяет автоматизировать проверку результатов тестирования по различным дисциплинам, сформировать базу данных о результатах тестирования и на ее основе создавать различные виды отчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полежаева Л. Н., Полежаев В. Д., Полежаева М. В. Система тестирования по дисциплине «Начертательная геометрия» // Успехи современного естествознания. 2006. № 10. С. 77–80.
2. Автоматизация ввода форм // Abby Software House. 2003. URL: http://www.docflow.ru/upload/images/WP_FP_rus.pdf. (дата обращения: 18.02.2016).

УДК 621.374.5

ЛОКАЛИЗАЦИЯ МАКСИМУМОВ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА
ВДОЛЬ МНОГОПРОВОДНЫХ СТРУКТУР

Р. Р. Газизов, А. М. Заболоцкий, Т. Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Аннотация – Отмечена актуальность исследования особенностей распространения сверхкоротких импульсов (СКИ) и локализации максимумов сигнала вдоль связанных линий. Проведено моделирование СКИ в форме трапеции, распространяющегося в микрополосковой меандровой линии при изменении зазора между ее проводниками и их длины, а также исследована шина печатной платы радиоприемного устройства (РПУ) системы автономной навигации (САН) космического аппарата. При изменении зазора выявлен и локализован максимум напряжения, в 2 раза превышающий амплитуду сигнала на входе и выходе и смещающийся от центра к выходу линии. При изменении длины выявлен и локализован максимум напряжения, в 1,5 раза превышающий амплитуду сигнала на входе. В шине печатной платы РПУ САН выявлен и локализован максимум напряжения, в 2,7 раза превышающий амплитуду сигнала на входе. Показано, что локализация максимума непостоянна: в большинстве случаев в меандровой линии он во втором проводнике, в некоторых – в первом, при определенной длине проводников максимум не наблюдается.

Ключевые слова: микрополосковая меандровая линия, печатная плата, сверхкороткий импульс, локализация максимумов сигнала, электромагнитная совместимость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Распространение электрических сигналов в линиях связи печатных плат хорошо исследовано [1, 2]. Однако особенности явлений, происходящих при значительном увеличении взаимной связи между проводниками, изучены недостаточно. Кроме того, большинство исследований проведено в частотной области, тогда как временной уделено меньше внимания. Между тем изучение процессов во временной области может дать новые результаты, например, позволить усовершенствовать защиту от сверхкоротких импульсов (СКИ) [3, 4]. Кроме того, представляются актуальными выявление и локализация максимумов сигнала в связанных линиях, поскольку их результаты могут быть полезны для выявления и локализации мест возможных паразитных взаимовлияний, излучений и восприимчивости, чтобы своевременно принять меры по их устранению для обеспечения электромагнитной совместимости и информационной безопасности. Другим применением может быть определение мест установки датчиков для контроля полезных сигналов или мониторинга помеховых сигналов, обеспечивающих требуемую чувствительность, что также важно для повышения помехозащищенности и надежности РЭА [5]. Наконец, реализация указанной возможности может оказаться полезной и для исследования особенностей распространения импульсных сигналов в линиях задержки печатных плат, например, в меандровых линиях [6].

Для таких исследований целесообразно использовать компьютерное моделирование. Это связано с необходимостью вычисления форм сигнала в большом числе точек вдоль каждого проводника сложных структур. Другой причиной является искажение сигнала входным импедансом измерителя. При разработке сложных печатных плат с высокой плотностью трассировки повсеместно используют системы компьютерного моделирования, обеспечивающие анализ и визуализацию параметров сигнала, что позволяет лучше оценить процессы, происходящие в них.

Для анализа межсоединений печатных плат широко используют квазистатический подход, так как схемотехнический анализ не всегда позволяет получить результаты достаточной точности, а электродинамический требует значительных вычислительных затрат. Теоретические основы квазистатического вычисления отклика

для произвольной схемы из отрезков многопроводных линий передачи (МПЛП) описаны в работах [7, 8]. На основе данной теории разработаны алгоритмы вычисления временного отклика [9], которые позволяют вычислить значения токов и напряжений только в узлах схемы.

Основные выражения и алгоритм, позволяющие вычислить значения тока и напряжения в заданной координате вдоль каждого проводника отрезка МПЛП для произвольной схемы, на основе которых усовершенствовано вычисление временного отклика в системе TALGAT, приведены в [10]. В этой же работе выполнено исследование двухвитковой меандровой микрополосковой линии, показавшее необходимость более тщательного исследования. Поэтому был рассмотрен один виток в диапазоне параметров [11]. Однако в данных работах исследованы одиночные отрезки связанных линий, а аналогичные исследования реальных печатных плат не выполнялись.

II. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель данной работы – обобщить и представить в единой работе ряд недавних и новых результатов по исследованию локализации СКИ вдоль многопроводных структур. Для достижения этой цели представляется необходимым решить следующие задачи. Для полноты изложения необходимо кратко описать теоретические основы моделирования. Далее целесообразно представить результаты локализации максимума в двухвитковой меандровой линии, а также при изменении зазора и длины одновитковой меандровой линии. Наконец, необходимо исследовать локализацию максимумов в шине реальной печатной платы. В последующих разделах представлены основные результаты решения этих задач.

III. ТЕОРИЯ

Для вычисления откликов в использован алгоритм, описанный в работе [9]. Он сводится к решению уравнения в частотной области для схемы из n отрезков МПЛП с сосредоточенными элементами на концах отрезков:

$$\mathbf{V}(s) = \left(s\mathbf{W} + \mathbf{H} + \sum_{k=1}^n \mathbf{D}_k \mathbf{Y}(s)_k \mathbf{D}_k^t \right)^{-1} \mathbf{E}(s), \quad (1)$$

где $s=j\omega$, ω – угловая частота; \mathbf{W} , \mathbf{H} – матрицы размера $A \times A$, описывающие произвольные оконечные и соединительные схемы из активных и реактивных элементов (A – количество параметров, вычисляемых в модифицированном методе узловых потенциалов); \mathbf{D}_k – матрица-селектор, отображающая токи, входящие в k -ю линию, с элементами d_{ij} , $j \in \{0, 1\}$, где $i \in \{1, \dots, N_k\}$, $j \in \{1, \dots, m_k\}$ с одним ненулевым значением в каждом столбце, $m_k=2 \cdot N_k$ – количество токов, входящих в k -ю линию, где N_k – число проводников k -й линии; $\mathbf{Y}(s)_k$ – матрица проводимостей для k -й линии; $\mathbf{V}(s)$ – вектор узловых напряжений; $\mathbf{E}(s)$ – вектор, состоящий из независимых источников напряжения или токов.

Однако уравнение (1) позволяет вычислять отклик только в узлах цепи. Поэтому для вычисления значений напряжения и тока вдоль линии передачи используются уравнения [10]:

$$\mathbf{V}(x) = \mathbf{S}_V(\mathbf{E}(x)\mathbf{C1} + \mathbf{E}(x)^{-1}\mathbf{C2}), \quad (2)$$

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{S}_I(\mathbf{E}(x)\mathbf{C1} - \mathbf{E}(x)^{-1}\mathbf{C2}), \quad (3)$$

где \mathbf{S}_V – матрица модальных напряжений; \mathbf{S}_I – матрица модальных токов; $\mathbf{E}(x)$ – диагональная матрица $\{\exp(-\gamma_1 x), \exp(-\gamma_2 x), \dots, \exp(-\gamma_{N_k} x)\}$ и γ_{N_k} – коэффициенты распространения линии передачи; x – координата вдоль линии передачи; $\mathbf{C1}$, $\mathbf{C2}$ – векторы констант. Вычисление значений матриц \mathbf{S}_I , \mathbf{S}_V , $\mathbf{E}(x)$ описано в [9]. Однако, чтобы найти $\mathbf{V}(x)$ и $\mathbf{I}(x)$ для каждого значения x , необходимо вычислить $\mathbf{C1}$ и $\mathbf{C2}$ как

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C1} \\ \mathbf{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_V & \mathbf{S}_V \\ \mathbf{S}_V \mathbf{E}(l) & \mathbf{S}_V [\mathbf{E}(l)]^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{V}(l) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}(l) = \mathbf{E}(x)$ при $x=l$ и l – длина линии; $\mathbf{V}(0)$ и $\mathbf{V}(l)$ – векторы констант, описывающие напряжение на концах линии передачи, полученные после решения уравнения (1).

IV. ИССЛЕДУЕМЫЕ СТРУКТУРЫ

В качестве исследуемых структур взяты микрополосковые меандровые линии из двух и одного витка. Линия из двух витков, включенная в тракт 50 Ом, с длиной полувитков по 27 мм изображена на Рис. 1 а, а ее попереч-

ное сечение – на рис. 1 б. Все параметры взяты из [10]. Аналогичная линия из одного витка с параметрами из [11] изображена на рис. 2.

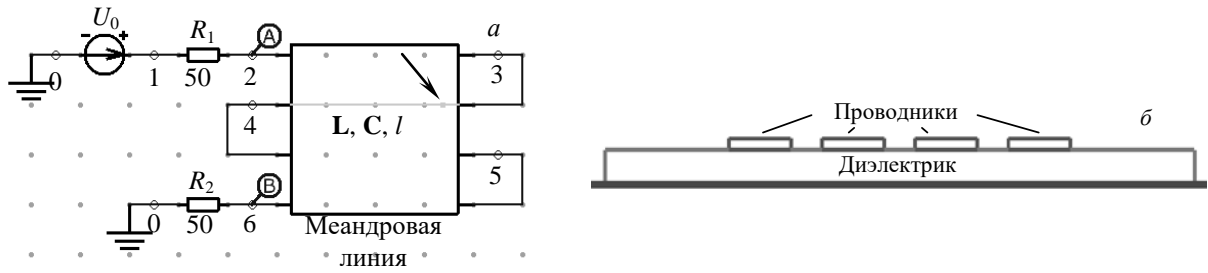


Рис. 1. Схема включения (а) и поперечное сечение (б) меандровой линии из двух витков

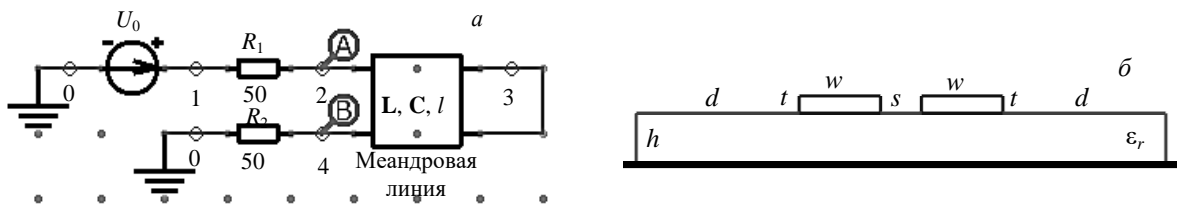


Рис. 2. Схема включения (а) и поперечное сечение (б) меандровой линии из одного витка

Исследование максимумов амплитуд разделено на две части: в первой части усиливалась взаимная связь между проводниками уменьшением зазора между ними, а во второй – изменялась длина проводников. Моделирование специально выполнено без учета потерь, чтобы они не ослабляли влияние факторов, увеличивающих амплитуду сигнала.

Однако вышеперечисленные структуры – это одиночные отрезки линии передачи. Поэтому, кроме них, выбрана шина печатной платы радиоприемного устройства (РПУ) системы автономной навигации (САН) космических аппаратов. Фрагмент платы изображен на рис. 3. Согласно параметрам стека печатной платы построены поперечные сечения каждого отрезка линий передачи. Ранее эта плата исследовалась лишь на уровень перекрестных помех [12]. Изменялись граничные условия и количество активных проводников. В качестве воздействия использовался СКИ в форме трапеции амплитудой ЭДС 1 В, с длительностью фронта, вершины и спада по 0.1 нс. Для моделирования холостого хода (ХХ) принят резистор с сопротивлением 50 кОм, а для короткого замыкания (КЗ) – резистор с сопротивлением 50 мОм.



Рис. 3. Локализация пиковых значений напряжения на фрагменте печатной платы РПУ САН
V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для структуры из рис. 1 вычислено по 50 форм напряжений вдоль каждого полувитка меандровой линии. Для верификации квазистатического моделирования системой TALGAT выполнено электродинамическое моделирование системой CST MWS [13] при прочих равных условиях (рис. 4).

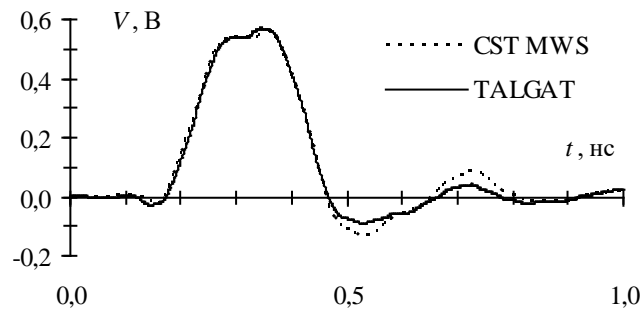


Рис. 4. Сравнение форм напряжений, вычисленных в CST MWS и TALGAT

Для структуры из рис. 2 выполнены вычисления для 22 разных расстояний между полувитками (s уменьшалось с 0.4 мм до 1 мкм) (рис. 5), затем выполнены вычисления при фиксированной ширине зазора ($s=0.2445$ мм) для 20 разных длин полувитков (значение l увеличивалось с 0.027 до 0.7 м) (рис. 6). Для обоих случаев приведены результаты только для вычислений, которые наиболее различны.

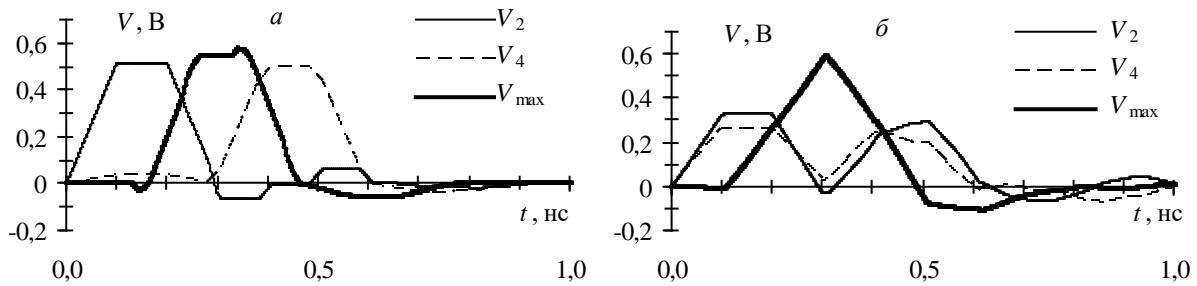


Рис. 5. Формы напряжения для Рис. 2 при $s = 0.4$ мм (а), 1 мкм (б)

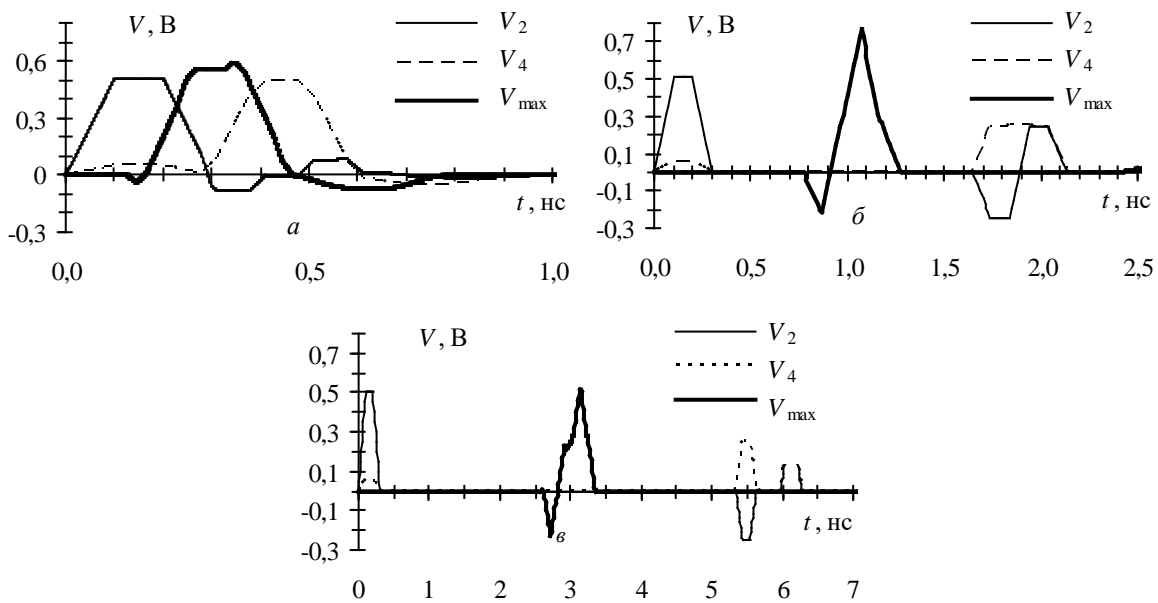


Рис. 6. Формы напряжения для Рис. 2 при $s = 0.2445$ мм для $l=0.027$ (а), 0.16 (б), 0.52 (в) м

Для шины печатной платы из рис. 3 выполнены вычисления для 40 случаев с различными комбинациями активных проводников, резисторов XX и КЗ, но приведены самые показательные результаты. В табл. 1 приведены параметры вычислений для 3 случаев (Запись «I...III(КЗ); IV, V(XX)» в столбце «Начало проводника» означает КЗ в начале проводников I...III и XX в начале проводников IV, V. Аналогично и для столбца «Конец проводника»).

ТАБЛИЦА 1
ПАРАМЕТРЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ РИС. 3

№ случая	Начало проводника	Конец проводника	№ проводника с пиковым значением	Пиковое значение	№ сегмента
1	I...III(КЗ); IV, V(XX)	I...III(XX); IV, V(КЗ)	1	2,7 В	14
2	I...III(XX); IV, V(КЗ)	I...III(КЗ); IV, V(XX)	1	0,21 В	9
3	I...III(XX); IV, V(КЗ)	I...III(КЗ); IV, V(XX)	2	0,41 В	11
				-0,37 В	14

Для случаев табл. 1 представлены формы напряжений в начале ($V_{нач}$) и конце ($V_{кон}$) всего проводника, а также формы с пиковыми значениями напряжения (V_{max} , V_{min}). Как видно, сигнал представляет собой последовательность импульсов, обусловленных многократными отражениями из-за XX и КЗ на концах проводников. На рис. 4 указаны точки на проводниках, в которых локализованы максимальные значения. Отметим, что каждый проводник делился на 20 сегментов, в каждом из которых вычислялся отклик и анализировалось его пиковое значение. Цифры означают номер случая из Табл. I. Во всех остальных случаях максимумы или минимумы не были ярко выражены, либо находились на концах отрезка линии передачи.

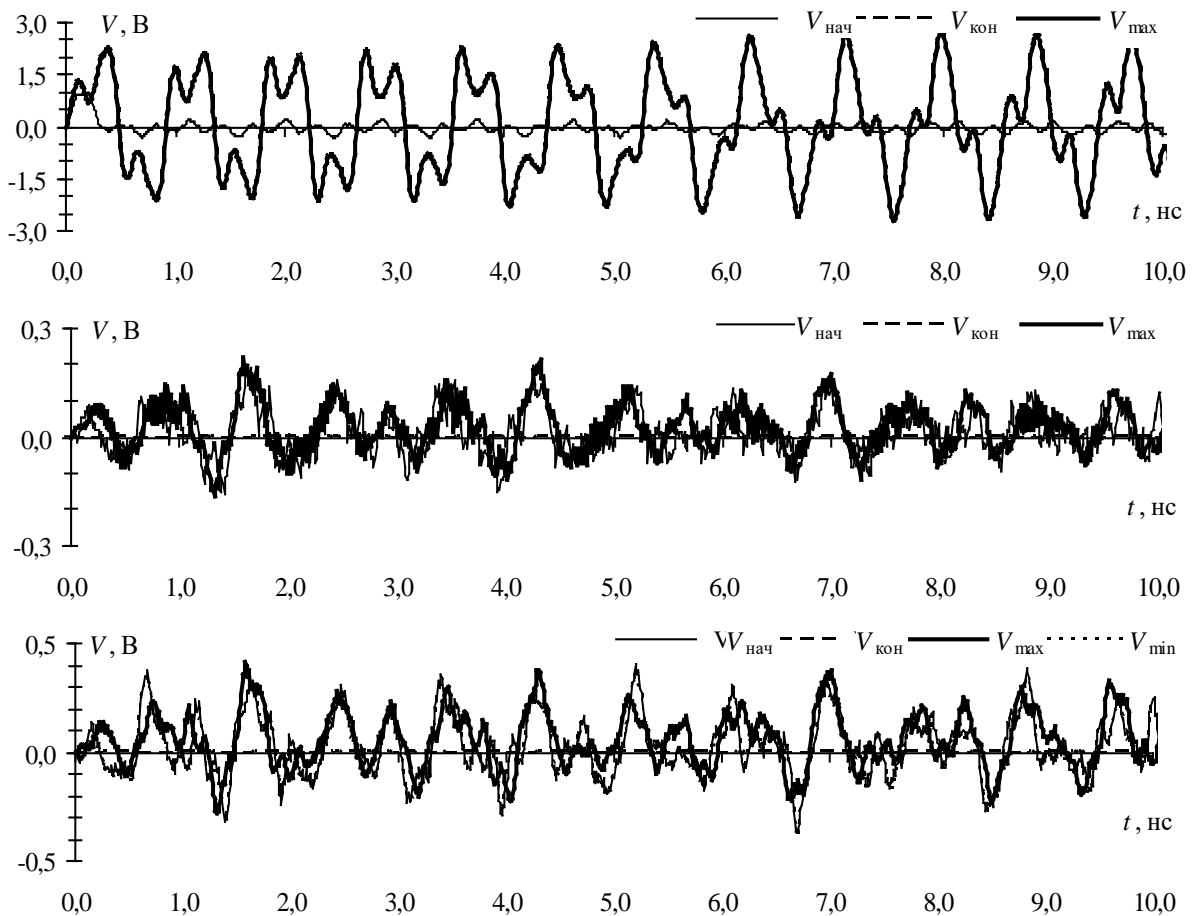


Рис. 7. Формы напряжения для случаев 1–3 (сверху вниз) из табл. 1

VI. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для структуры из рис. 1 выявлен и локализован максимум напряжения (показан на рис. 1 стрелкой), равный 0.57 В, что в 1.14 раза больше максимального напряжения в узле 2. Как видно из рис. 4, сравнение форм напряжений в точке локализованного максимума показывает хорошее согласование основной формы импульса.

На рис. 5 представлен выявленный и локализованный максимум, превышающий амплитуду сигнала на входе и выходе в 2 раза при минимальном зазоре. При изменении длины витка (l) амплитуда положительного импульса изменяется неравномерно (рис. 6). Так, при увеличении l с 0.027 до 0.16 м, она увеличивается с 0.595 до 0.765 В (при $l=0.16$ м наблюдается наибольшее значение для всех вычислений, рис. 6 б). При увеличении l до 0.52 м амплитуда снижается до 0.514 В, а при $l>0.52$ м максимум не наблюдается, наибольшее значение амплитуды сигнала будет на входе линии. Отрицательный импульс имеет наибольшее абсолютное значение (0.25 В) при $l=0.16$ м, но при $l=0.325$ м практически полностью отсутствует.

Проведенное исследование проясняет причину появления перенапряжений. Сигнал в любой точке можно представить суммой падающих и отраженных волн четной и нечетной мод. Максимум появляется, когда основной сигнал, не успев разложиться на моды, встречается с отраженной волной, в результате чего импульсы суммируются и появляется превышение напряжения.

Рассмотрим результаты для шины из табл. 1. Случай 1 показал самое значительное превышение напряжения на входе по сравнению со всеми остальными – в 2.7 раза. Отметим, что максимумы из случаев 2 и 3 находятся вблизи шины, проходящей слоем ниже (указано стрелками на рис. 3), так что связь с ней может оказаться критичной. Примечателен случай 3, показавший сразу два пиковых значения: максимальное (0.41 В) и минимальное (-0.37 В). Интересен и тот факт, что локализация пиковых значений непостоянна, а зависит как от значений резисторов, так и от воздействий.

VII. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате работы выявлены зависимости форм напряжений вдоль каждого проводника отрезка МПП и локализованных максимумов напряжений от расстояния между полувитками микрополосковой меандровой линии, а также от длины ее проводников; исследована шина печатной платы РПУ САН. В меандровых линиях локализован максимум напряжения СКИ, превышающий амплитуду СКИ на входе и выходе при изменении зазора в 2 раза, а при изменении длины проводников – в 1.5 раза. В шине локализован максимум напряжения, в 2.7 раза превышающий амплитуду сигнала на входе, что может быть причиной различных паразитных эффектов. Полученные результаты показывают актуальность вычислений форм напряжений и токов вдоль проводников связанных линии передачи, а также выявления и локализации максимумов амплитуд напряжений и токов.

VIII. БЛАГОДАРНОСТЬ

Разработка программного обеспечения выполнена в рамках выполнения проектной части государственного задания №8.1802.2014/К Минобрнауки России. Моделирование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронной вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 224 с. ISBN 5-256-00361-5.
2. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: Группа ИДТ: Издательский Дом «Технологии», 2007. С. 616.
3. Surovtsev Roman S., Gazizov Talgat R., Zabolotsky Alexander M. Pulse Decomposition in a Turn of Meander Line as a New Concept of Protection against UWB Pulses // Proc. of Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), May 2015. – Omsk, 2015. P. 7.
4. UWB pulse decomposition in simple printed structures, Gazizov Alexander T., Zabolotsky Alexander M., Gazizov Talgat R. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2016. Vol. 58, no.4. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2548783. Scopus:2-s2.0-84964501696
5. Орлов П. Е., Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М. Новая концепция создания интегрированных датчиков для контроля электромагнитной обстановки в бортовой аппаратуре космического аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2012. № 5. С. 20–23.
6. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Исследование искажений импульсного сигнала в меандровых линиях печатных плат // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2007. № 3. С. 21–24.

7. Djordjevic A. R, Sarkar T. K. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1987. Vol. 35, no. 10. P. 898–907.
8. Achar R., Nakhla M. S. Simulation of high-speed interconnects. Proceedings of the IEEE. 2001. Vol. 89, no. 5. P. 693–728.
9. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2007. 152 с.
10. Газизов Р. Р., Заболоцкий А. М., Орлов П. Е. Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2015. № 4 (38). С. 147–150.
11. Газизов Р. Р., Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Исследование распространения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении зазора между связанными проводниками // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2016. Т. 19, № 1. С. 79–82.
12. Суровцев Р. С., Газизов Т. Р. Оценка целостности сигналов в печатных платах системы автономной навигации // Труды МАИ. 2015. № 83. С. 1–19.
13. CST MICROVAWE STUDIO [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cst.com/products/CSTMWS>, свободный (дата обращения: 11.05.2016).

УДК 621.375.4

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ SiGe БИКМОП ЛИНЕЙНОГО УСИЛИТЕЛЯ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ 1 – ГГц

А. А. Калентьев, М. В. Черкашин, Д. В. Гарайс, Л. И. Бабак

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Аннотация – В статье приведены результаты проектирования линейного усилителя диапазона частот 1-7 ГГц на основе гетеробиполярных транзисторов (техпроцесс 0.25 мкм SiGe БИКМОП) с помощью программы автоматизированного структурно-параметрического синтеза *Geneamp*, основанной на генетическом алгоритме. Достоинствами разработанного усилителя являются: широкая полоса пропускания (перекрываются L-, S- диапазоны и частично С-диапазон); хороший уровень согласования на входе и выходе (менее -12 дБ); невысокий коэффициент шума (ниже 3 дБ). Проектирование СВЧ усилителя с использованием программы *Geneamp* позволило значительно сократить время разработки устройства.

Ключевые слова: СВЧ усилитель, автоматизированное проектирование, SiGe гетеропереходный транзистор, генетический алгоритм.

I. ВВЕДЕНИЕ

Линейные усилители (ЛУ) СВЧ диапазона находят широкое применение при построении приемопередающих модулей (ППМ), используемых в радарх и системах радиорелейной связи [1]. СВЧ ППМ чаще всего выполняют на основе монолитных интегральных схем (МИС), изготавливаемых по технологиям полупроводников типа АЗВ5 (*GaAs*, *GaN*). Однако в последнее время чаще используют технологии на базе SiGe БИКМОП технологий [2,3]. Ключевыми достоинствами МИС, выполненных на основе БИКМОП, в отличие от технологий АЗВ5, являются большая степень интеграции, меньшие габариты и стоимость чипа, более низкое энергопотребление и др. Кроме того, для реализации ППМ с цифровой обработкой сигнала весьма важно то, что SiGe БИКМОП технологии позволяют совмещать аналоговые и сложные цифровые схемы управления (драйверы) в едином технологическом процессе на одном кристалле. В то же время при использовании АЗВ5 технологий реализация цифровых драйверов весьма сложна, удорожает разработку, увеличивает габариты МИС и ограничивает возможности управления [2, 3].

В настоящей работе представлены результаты разработки ЛУ диапазона частот 1–7 ГГц на базе SiGe БИКМОП технологий, предназначенного для применения в качестве малошумящего или буферного усилителя в составе широкополосных систем связи и радиолокации. Для проектирования использовалась программа автоматизированного структурно-параметрического синтеза усилителей *Geneamp*, основанная на генетическом алгоритме (ГА). Это позволило значительно сократить время разработки.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной задачей работы являлись: синтез вариантов принципиальной схемы линейного усилителя 1–7 ГГц на основе гетеробиполярных транзисторов (техпроцесс 0.25 мкм *SiGe* БиКМОП *SG25V* фирмы *IHP*) с помощью программы автоматизированного структурно-параметрического синтеза *Geneamp*, выбор лучшего варианта усилителя и окончательная оптимизация структуры и параметров устройства.

III. ТЕОРИЯ

В работах [4–6] приведено описание программы *Geneamp*, показавшей высокую эффективность в задачах синтеза принципиальных схем одно- и многокаскадных СВЧ линейных и маломощных усилителей. В программе используется разработанный авторами ГА, обеспечивающий одновременный поиск как в области структур СВЧ усилителей, так и параметров используемых пассивных элементов.

На рис. 1 представлена структурная схема СВЧ усилителя, содержащая каскадно включенные активные блоки (АБ) и согласующе-корректирующие цепи (СКЦ). Очевидно, число возможных вариантов (схем) АБ и СЦ практически бесконечно. Но в потенциально бесконечном множестве структур невозможно организовать эффективный поиск.

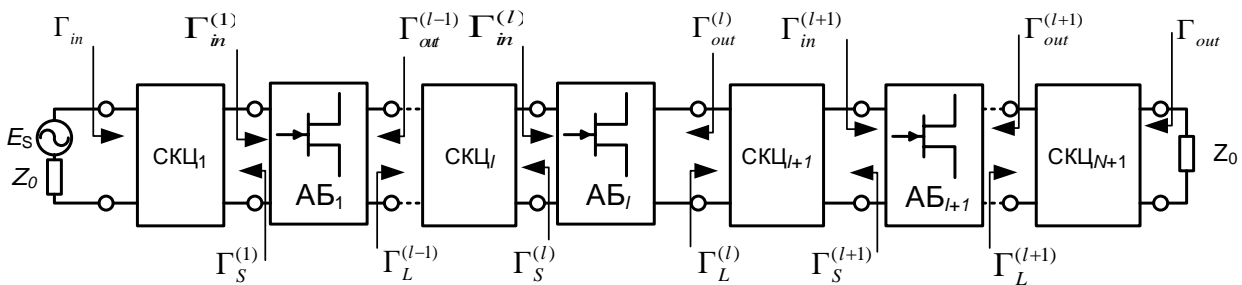


Рис. 1. Структурная схема *N*-каскадного усилителя с СКЦ

С целью ограничения поискового пространства для ГА были проанализированы существующие принципиальные схемы СВЧ МШУ. На основе обобщения выявленных частных структурных схем АБ получена обобщённая структурная схема (обобщённый шаблон) активного блока СВЧ ТУ (рис. 2а) Она содержит активный элемент (АЭ) и подключённые к нему пассивные блоки (ПБ). В активный блок могут входить до 7 ПБ (рис. 2а), в том числе последовательный ПБ на входе (*In_Ser*), последовательный ПБ на выходе (*Out_Ser*), общий последовательный ПБ (*Com_Ser*), параллельный ПБ на входе (*In_Par*), параллельный ПБ на выходе (*Out_Par*), ПБ последовательной обратной связи (ОС) (*SF*), ПБ параллельной ОС (*PF*). СКЦ имеют лестничную структуру, т.е. в звеньях содержатся последовательно и параллельно включенные ПБ (рис. 2б).

В свою очередь, ПБ представляют собой различные варианты последовательного и параллельного соединения сосредоточенных и распределённых элементов: резисторов, конденсаторов, индуктивностей, линий передачи и др. Заметим, что в программе могут быть использованы как идеализированные модели пассивных элементов, так и точные модели, сгенерированные в САПР СВЧ устройств и учитывающие паразитные параметры [7].

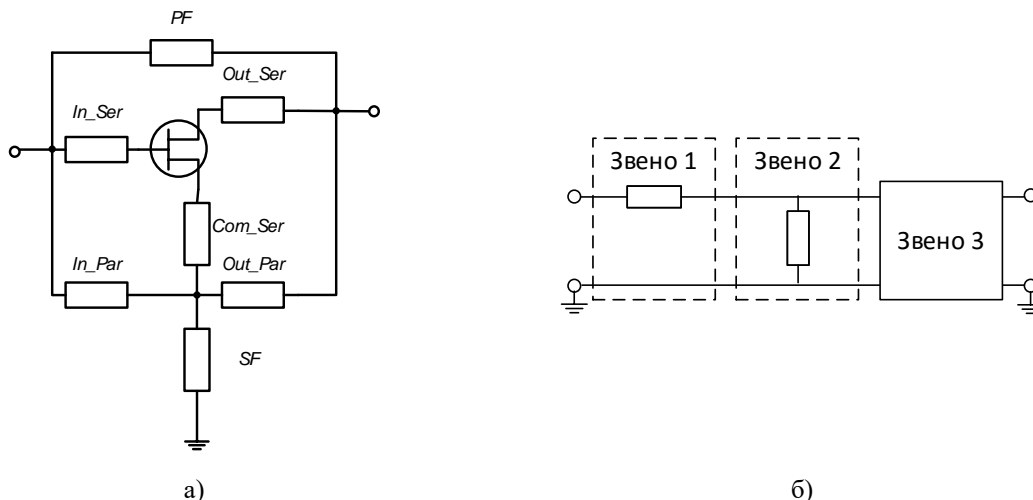


Рис. 2. Структурная схема активного блока с ПБ (а) и СКЦ (б)

Поиск по заданному шаблону принципиальных схем, удовлетворяющих поставленным требованиям схем СВЧ усилителей, осуществляется с помощью бинарного ГА. Бинарный ГА был выбран из-за лучшей сходимости в ограниченном поисковом пространстве. Информация о схеме и параметрах усилителя представляется в виде двоичной хромосомы, различными двоичными числами различной длины кодируются способы включения, типы, а также значения элементов, используемых в АБ и СКЦ. В процессе синтеза ГА работает с совокупностью хромосом – популяцией, что позволяет уменьшить вероятность сходимости алгоритма в локальные оптимумы.

Качество полученного решения определяется с помощью рассчитанного значения целевой функции (ЦФ). Расчёт значения ЦФ выполняется следующим образом: восстанавливается структура и значения элементов принципиальной схемы из хромосомы; рассчитываются частотные зависимости характеристик СВЧ усилителя – параметров рассеяния, коэффициента шума и коэффициента устойчивости; далее рассчитанные значения сворачиваются в скалярное значение ЦФ, показывающее, насколько комплекс характеристик усилителя отвечает поставленным требованиям. Симметричная R-функция Рвачёва [8] хорошо себя зарекомендовала на задаче многокритериального структурно-параметрического синтеза СВЧ линейных усилителей.

На каждой итерации ГА выполняет ряд генетических операторов (генерация новых хромосом, селекция, кроссинговер (скрещивание хромосом) и мутация. После выполнения одной итерации ГА популяция обновляется новыми хромосомами (вариантами СВЧ усилителей), которые имеют лучшее значение ЦФ, а значит, лучше удовлетворяют поставленным требованиям. Синтез завершается при достижении заданных значений ЦФ или времени синтеза либо программа может быть остановлена инженером-проектировщиком.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Усилитель выполняется на основе технологии *SiGe* БиКМОП *SG25V* фирмы *IHP* (Германия). Требования к усилителю: полоса рабочих частот $\Delta f = 1-7$ ГГц, коэффициент усиления по мощности $G_T = 18 \pm 1$ дБ, коэффициент отражения по входу $|s_{11}| \leq -10$ дБ и выходу $|s_{22}| \leq -10$ дБ, коэффициент шума $NF \leq 3$ дБ, линейная выходная мощность по сжатию сигнала на 1 дБ $P_{1dB} \geq 0$ дБм, напряжение питания $V_D = 4-5$ В, потребляемый ток $I_D \leq 20$ мА (см. также табл.1).

Активный элемент (АЭ) представляет собой каскодное включение транзисторов ОЭ-ОБ, что позволило уменьшить общий потребляемый ток, так как в этом случае транзисторы по постоянному току включены последовательно. Кроме того, каскодное включение транзисторов позволяет наиболее полно использовать напряжение питания 5 В, которое равномерно делится между транзисторами (отдельный транзистор имеет максимальное напряжение $U_{к\max} \leq 2.7$ В).

Было выполнено 5 запусков программы *Geneamp* длительностью по 10 минут каждый. Из полученных в результате синтеза вариантов схем были выбраны четыре, параметры которых удовлетворяют заданным требованиям или близки к ним. Результирующие параметры выбранных схем усилителей сведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

Усилитель	Δf , ГГц	G_T , дБ	$ s_{11} $, дБ	$ s_{22} $, дБ	NF , дБ	P_{1dB} , дБм	$V_D \setminus I_D$ В \ мА
Требования	1-7	18 ± 1	-10	-10	3	0	5 \ 20
Усилитель 1	0.6...7	18.4...19.1	-12.5	-12.6	2.7	–	–
Усилитель 2	1...7	18.4...19	-9.4	-12.2	2.85	–	–
Усилитель 3	1...7	16.6...19	-9.9	-9.9	2.7	–	–
Усилитель 4	0.6...7	18.5...19.2	-10.4	-8.8	3.1	–	–
Оптимизированный усилитель 1	0.5...7	18...18.6	-12	-12	2.85	2	5 \ 17

Для дальнейшей реализации была выбрана схема 1 усилителя. Окончательная схема усилителя по переменному току (после небольшой оптимизации и устранения избыточных элементов) показана на рис. 3а, а ее характеристики, полученные с помощью моделирования частотных характеристик в САПР – на рис. 3б.

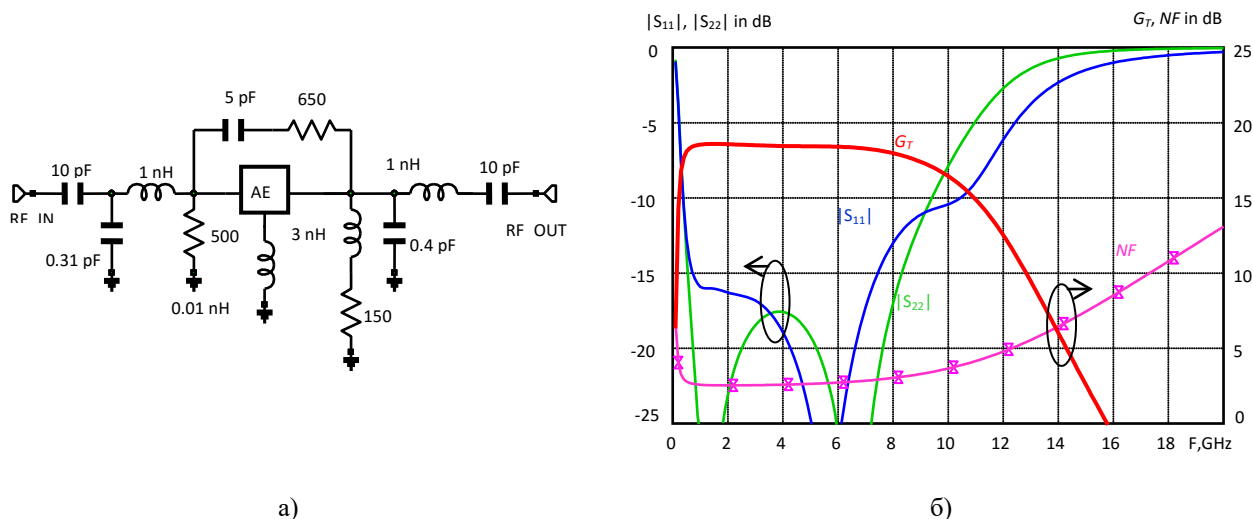


Рис. 3. Схема 1 усилителя по переменному току (а) и его характеристики (б)

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из табл. 1 видно, что полученные в процессе синтеза схемы усилителя обладают характеристиками, близкими к поставленным требованиям. Помимо этого, выбранная схема сразу отвечала условиям практической реализуемости, так как на этапе ввода структурных требований было задано использование цепей питания по постоянному току, блокировочных конденсаторов на входе, выходе и в ПБ параллельной обратной связи АЭ. Также были заданы диапазоны варьирования параметров пассивных элементов в соответствии с ограничениями используемой технологии изготовления.

Проанализируем эффективность разработки принципиальной схемы усилителя с помощью программы *Geneamp*. Получение удовлетворительного набора принципиальных схем заняло порядка 2-х часов. Решение подобной задачи инженером с использованием только распространённых на рынке САПР – *ADS* фирмы *Keysight* или *MWO* фирмы *NI AWR* могло занять от нескольких дней до одной недели. Таким образом, можно утверждать о значительной экономии времени разработчика (порядка нескольких рабочих дней). Для завершения проектирования усилителя необходимо выполнить разработку его топологии для выбранной технологии изготовления и выполнить финальную оптимизацию и электромагнитное моделирование.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен пример разработки принципиальной схемы линейного СВЧ усилителя 1-7 ГГц на основе технологии *SiGe* БиКМОП *SG25V* фирмы *IHP*. Использование программы автоматизированного структурно-параметрического синтеза *Geneamp*, основанной на ГА, позволило значительно сократить время разработки. Благодаря широкой полосе пропускания усилитель может использоваться в составе СВЧ ППМ различного назначения, работающих в *L*-, *S*- и *C*-диапазонах частот, в качестве входного малошумящего усилителя, а также буферного усилителя в тракте ПЧ или гетеродина. При этом реализация устройства по технологии *SiGe* БиКМОП позволяет интегрировать его на общем кристалле с другими функциональными блоками (например, аттенуатором, фазовращателем, гетеродином и пр.), что дает возможность выполнить весь ППМ на основе архитектуры «система на кристалле».

Работа выполнялась при финансовой поддержке прикладных научных исследований Министерством образования и науки РФ. Уникальный идентификатор ПНИЭР *RFMEFI57715X0179*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bahl I. J. Control Components Using Si, GaAs and GaN Technologies. // Artech House. 2014. P. 310.
2. Bettidi A. [et al.]. X-Band Transmit Receive Module MMIC Chip-Set Based on Emerging GaN and SiGe Technologies // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Oct.2010. P. 250–255.
3. Dinc T. [et al.]. X-band SiGe bi-complementary metal-oxide semiconductor transmit/receive module core chip for phased array RADAR applications // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2015. Vol. 9, no. 9. P. 948–956.
4. Babak L. I., Kokolov A. A., Kalentyev A. A., Garays D. V. A New Genetic-Algorithm-Based Technique for Low Noise Amplifier Synthesis // The European Microwave Integrated Circuits Conference 2012. P. 381–384.

5. Калентьев А. А., Гарайс Д. В., Добуш И. М., Бабак Л. И. Структурно-параметрический синтез СВЧ транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием моделей монолитных элементов // Доклады ТУСУРа. – 2012. № 2 (26). С. 104–112.

6. Добуш И. М., Калентьев А. А., Жабин Д. А., Гарайс Д. В., Бабак Л. И. Разработка МШУ диапазона 1-2 ГГц с использованием программы структурного синтеза СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 47–51.

7. Жабин Д. А., Калентьев А. А., Добуш И. М., Гарайс Д. В., Бабак Л. И. Методика автоматизированного синтеза СВЧ МШУ с учётом особенностей топологии // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 25-ой Междунар. Крым. конф. Севастополь. 2015. С. 119–120.

8. Рвачев В. Л. Геометрические приложения алгебры логики. Киев: Техника, 1967. 235 с.

УДК 621.397.2

ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВИДЕОКАМЕР ПО ХАРАКТЕРНЫМ ФРАГМЕНТАМ ФОРМИРУЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. В. Каменский, М. Ю. Маланин, М. И. Курячий

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

Аннотация – В тенденциях развития современного общества с каждым годом все больше устанавливается и вводится в эксплуатацию различные камеры видеонаблюдения, используемые для различных целей (охранные системы видеонаблюдения, дорожные камеры фиксации правонарушений, камеры контроля качества на производстве и т.д.).

В связи с этим все чаще возникает вопрос как в натуральных условиях оценить качество изображений формируемых видеокамерами. Для этой задачи нами предложена методика оценки разрешающей способности видеокамер по характерным фрагментам изображений. Проведен эксперимент по оценке значений контрастно-частотных характеристик программными средствами с целью оценки разрешающей способности видеокамер по выбранным фрагментам телевизионных изображений.

Ключевые слова: телевизионные изображения, разрешающая способность, контрастно-частотная характеристика, реперные объекты.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы количественно оценить разрешающую способность формируемых видеокамерами изображений, принято считать количество отдельно различимых вертикальных и горизонтальных линий. Так как яркостная составляющая имеет более широкий (в 4 раза) спектр, чем цветокодирующая, то различают разрешающую способность в канале яркости и цветовое разрешение.

Для визуального измерения разрешения видеоизображения используют специальные настроечные тестовые таблицы, в которых изображаются группы линий переменной толщины – «клинья».

Для того чтобы полностью определить разрешение, нам нужно знать не число, а функцию – зависимость контраста между черной и белой линиями от числа линий в кадре, так называемую контрастно-частотную характеристику (КЧХ), которую позволяет сформировать программа Imatest [1].

Измерения производились по таблице стандарта ISO 12233. На графике КЧХ в программе Imatest по оси ординат (оси Y) отложено значение контраста (1 – 100%, 0,5 – 50%, 0,3 – 30%), а по оси абсцисс (оси X) отложена частота следования линий в так называемых «циклах на пиксел». За один цикл принимается пара «черная линия – белая линия». Таким образом, «предельный случай в 1080 ТВЛ (телевизионная линия)», когда одна линия приходится на один пиксел, соответствует 0,5 цикла на пиксел. Отсюда можно получить выражение для перевода числа «циклов на пиксел» в ТВЛ [2].

$ТВЛ = (CPR/0,5) * 1080$ (Предельное разрешение в ТВЛ для камеры высокой четкости в вертикальном направлении).

Здесь CPR – число «циклов на пиксел» на уровне 0,5.

С использованием программы Imatest была разработана методика измерения разрешающей способности камеры высокой четкости eVidence. EVidence Apix-Bullet / M2 Lite LED 3312 – двухмегапиксельная IP-видеокамера с ИК-подсветкой, предназначенная для использования в уличных условиях. Качество изображения,

которое обеспечивает EVIDENCE Apex-Bullet / M2 Lite LED 3312, отвечает требованиям, предъявляемым к современным системам видеонаблюдения. В IP-видеокамере EVIDENCE имеется встроенный детектор движения, применяется технология подавления шумов (DNR).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Провести лабораторные и натурные испытания методики измерения разрешающей способности видеокамер. Предложить методику измерения разрешающей способности для стационарно установленных видеокамер по характерным фрагментам реальных изображений.

III. ТЕОРИЯ

С помощью программы Imatest была разработана методика измерения разрешающей способности IP-камеры eVIDENCE по таблице стандарта ISO 12233, представленной на рис. 1 [3].

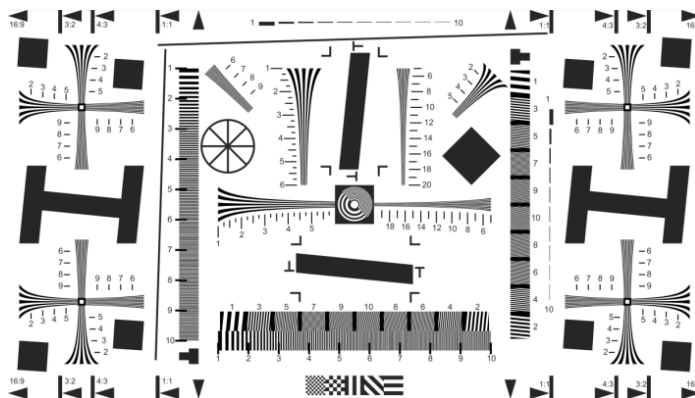


Рис. 1. Испытательная таблица стандарта ISO12233 для измерения разрешающей способности и четкости телевизионного изображения

В системах обработки и анализа изображений в качестве одного из этапов обработки является предварительная фильтрация, производимая с целью повышения четкости, компенсации смаза, устранения турбулентности и др. Для этого необходимо иметь достаточно точную оценку характеристики искажающей системы – функции рассеяния точки (ФРТ). Особенно важно решение этой задачи для активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем (АИ ТВС), работающих в сложных метеоусловиях [4].

В ходе испытаний по таблице стандарта ISO 12233 было снято четыре изображения (изображения в фотобоксе с использованием тестовой таблицы, изображение с использованием реперов и два изображения в натуральных условиях).

Данные полученные с использованием тестовой таблицы стандарта ISO 12233, представлены на графике, приведенном на рис. 2.

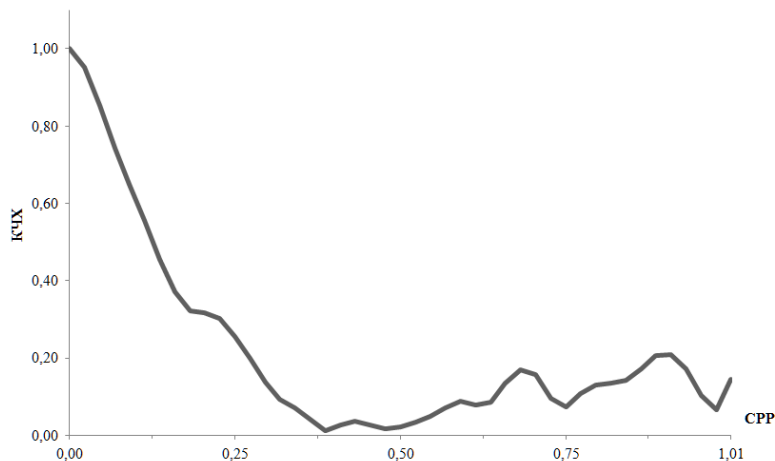


Рис. 2. График КЧХ изображения, полученного с использованием тестовой таблицы

Рассчитав по формуле перевода числа «циклов на пиксел» в ТВЛ получим значение в 274,3 ТВЛ. Данное значение будет считаться предельным так, как было получено в идеальных лабораторных условиях.

Далее было получено изображение, отснятое в помещении, в котором заранее были размещены три реперных объекта одинакового размера в различных зонах измерения находящихся на разном расстоянии от камеры, которые создавали перепады от черного к белому и фиксировались ПО Imatest. На рис. 3 приведен снимок помещения с искусственными реперными объектами.



Рис. 3. Снимок помещения с искусственными реперами

На рис. 4 приведены графики КЧХ, полученные в ПО Imatest с использованием искусственных реперных объектов.

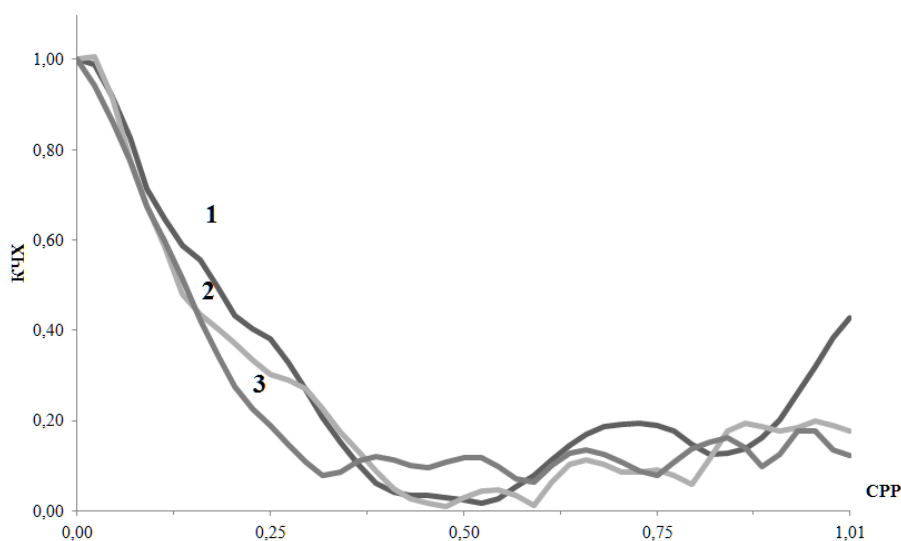


Рис. 4. График КЧХ изображений полученных с использованием искусственных реперных объектов:
1– стена; 2– колонна; 3– доска

Далее были проведены экспериментальные исследования в натуральных условиях (вид на стену спортивного комплекса – рис. 5; вид на грузовые контейнеры – рис. 7).

На данных изображениях были найдены естественные реперные объекты (перепады с темного на светлое). Зависимости КЧХ для этих случаев представлены на рис. 6 и рис. 8 соответственно.



Рис. 5. Снимок стены спортивного комплекса ТУСУР

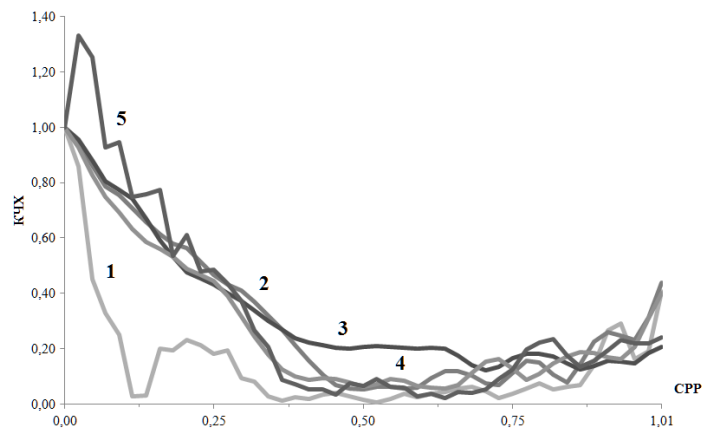


Рис. 6. График КЧХ, полученных по изображению спорткомплекса ТУСУР:
1—окно; 2—сайдинг 1; 3—сайдинг 2; 4—сайдинг 3; 5—труба



Рис. 7. Снимок грузовых контейнеров

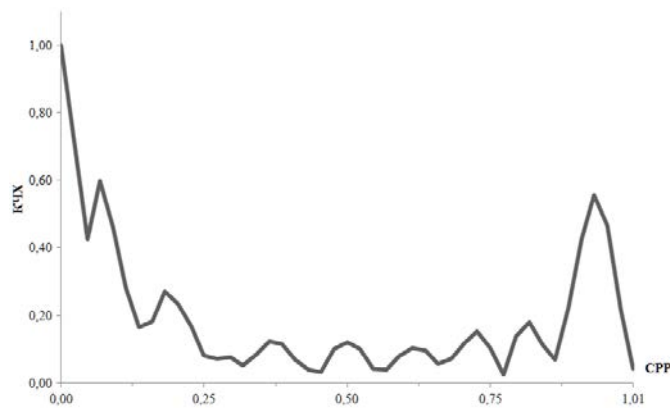


Рис. 8. График КЧХ, полученный по изображениям грузового контейнера

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

По результатам экспериментальных исследований построены КЧХ по всем изображения с учетом формулы перевода «цикл на пиксел» в ТВЛ, и получены следующие значения разрешения, которые приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОЛИЧЕСТВА ТВЛ ПО КЧХ
ПО УРОВНЕ 0,5 ОТСНЯТЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

		Количество ТВЛ
Испытательная таблица		274,3
Изображение с использованием реперных объектов	Стена	388,8
	Колонна	287,3
	Доска	302,4
Изображения спортивного комплекса	Окно	92,2
	Сайдинг 1	505,4
	Сайдинг 2	421,2
	Сайдинг 3	429,8
Труба		486
Изображения грузовых контейнеров		85,3

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При усреднении полученных результатов видно (табл. 2), что реперный объект, расположенный на стене лаборатории, находился ближе остальных, вследствие чего и было получено максимальное разрешение для данного эксперимента. Реперные объекты, расположенные в других областях измерения, также показали результаты, близкие к измерениям, проведенным на тестовой таблице в фотобоксе.

Из результатов, полученных с реальных изображений, снятых в натуральных условиях, видно, что измерение по изображениям сайдинга корпуса и трубе, прилегающей к сайдингу, показали результаты приближенные к эксперименту с реперными объектами в помещении.

Эксперимент с изображениями грузовых контейнеров и окном на спорткомплексе не дал приемлемых результатов. Для изображения окна это связано с небольшой областью измерения и его размерами, а в случае с изображениями контейнеров из-за отсутствия приемлемого размера области измерения перепада.

ТАБЛИЦА 2
УСРЕДНЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОЛИЧЕСТВА ТВЛ ПО КЧХ
ПО УРОВНЕ 0,5 ОТСНЯТЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

	Количество ТВЛ
Испытательная таблица	274,3
Изображение с использованием реперных объектов	326,2
Изображения спортивного комплекса ТУСУР	386,9
Изображения грузовых контейнеров	85,3

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование искусственных и естественных реперных объектов позволяет оценить разрешение видеокамер, не прибегая к их тестированию в лабораторных условиях, но нужно учитывать то, на каком расстоянии должен располагаться репер и его размеры относительно самого изображения.

2. При измерениях разрешения по реальным изображениям с использованием перепадов, расположенных на них, видно, что изображение сайдинга, которым обшиваются многие здания в современных городах, могут быть использованы в качестве естественных «реперных объектов» для измерения разрешения. Более мелкие

объекты, такие как изображение окна и края контейнера, на которых нет большого пространства для выбора области измерения, и поэтому нельзя провести оценку характеристик видеокамер.

3. Поскольку оценка качества изображения уличных камер в больших городах является необходимой и востребованной задачей, то данные эксперименты позволят продолжить работу в данном направлении и разработать оптимальную методику для определения разрешающей способности видеокамер.

Исследовательские работы были выполнены при финансовой поддержке.

1. Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания №2014/225 на 2015 год по НИР «Исследование и разработка методов и средств повышения качества изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем видения в сложных метеоусловиях и малопрозрачных средах» (код проекта 3643).

2. РФФИ в рамках гранта по научному проекту №16-47-700939 «Исследование и разработка методов и средств повышения эффективности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем мониторинга и обеспечения комплексной безопасности объектов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменский А. В., Маланин М. Ю. Измерение разрешающей способности в телевизионных изображениях с использованием программных средств // Научная сессия ТУСУР-2014: материалы Всерос. техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-16 мая 2014 г. Томск: В-Спектр, 2014. Ч. 1. С. 79–81.

2. Imatest Documentation by Norman Koren. URL: <http://www.imatest.com/docs/> (дата обращения: 1.03.2016).

3. Конохов А. Л., Костевич А. Г., Курячий М. И. Определение функции рассеяния точки по характерным фрагментам изображений // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2(26). С. 116–120.

УДК 621.314

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

А. А. Кузнецов¹, В. Г. Шахов¹, В. Ю. Тэттер¹, Е. А. Артюкова¹, В. А. Чернорай²

¹Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

²Открытое акционерное общество «Российские железные дороги», г. Омск, Россия

Аннотация – В статье рассмотрены вопросы оценки технического состояния силовых трансформаторов тяговых подстанций, эксплуатируемых на Западно-Сибирской железной дороге. Описаны применяемые методы диагностирования силовых трансформаторов, указаны их основные достоинства и недостатки. Отмечено, что основным методом диагностирования является газовая хроматография, применяемая в настоящее время на Западно-Сибирской железной дороге. Проведен эксперимент, в ходе которого выявлено распределение частичных разрядов. Выявлено, что перспективными методами диагностирования силовых трансформаторов, работающих в режимах тяговой нагрузки, является акустико-эмиссионный метод, основанный на локализации частичных разрядов.

Ключевые слова: трансформатор, тяговая подстанция, частичные разряды, методы диагностирования.

ВВЕДЕНИЕ

Силовые трансформаторы тяговых подстанций характеризуются значительным износом. Большая их часть работает более двадцати пяти лет и требует постоянного мониторинга. На конец 2015 г. по результатам хроматографического анализа на особом контроле находится тридцать один трансформатор, тридцать из которых не более чем по двум газам. Данные приведены в табл. 1. Для трансформаторов, находящихся на особом контроле период диагностирования сокращается с 12 до 6 месяцев.

ТАБЛИЦА 1.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ, НАХОДЯЩИХСЯ НА ОСОБОМ КОНТРОЛЕ
ПО ИТОГАМ 2015 ГОДА (28.12.2015 Г.)

Центр хроматографии	Количество трансформаторов
ЭЧ-2 Омск	13
ЗСБДКРЭ	2
ЭЧ-13 Камень-на-Оби	10
ЭЧ-16 Кемерово	6
Итого	31

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время проблеме оперативного диагностирования тяговых трансформаторов уделяется особое внимание. Это обусловлено превышением срока эксплуатации оборудования (более 25 лет), моральным устареванием и, как следствие, необходимостью оперативного определения дефектов. Сейчас многие ученые занимаются этой проблемой. Такие как А. С. Карандаев, С. Е. Мостовой, А. А. Чертоусов, В. А. Русов, С. К. Цветаева, Q. H. Wu, Quan Jiangtao и другие. Для диагностирования силовых трансформаторов, находящихся на балансе ОАО «Российские железные дороги», применяется метод газохроматографической диагностики. Его применение характеризуется трудоемким процессом отбора пробы масла: должна быть обеспечена абсолютная герметичность. Недопустимым является загрязнение и увлажнение образца.

Также после отбора пробы время хранения масла не должно превышать одних суток. Данное условие представляется достаточно сложным из-за большого количества трансформаторов, находящихся на значительном расстоянии друг от друга и от лаборатории. Поэтому метод газохроматического анализа является недостаточно оперативным (работы проводятся со снятием напряжения бригадой оперативно-технического персонала и не позволяют сразу определить состояние трансформатора).

ТЕОРИЯ

В последние годы широкое распространение получили методы, основанные на определении места расположения и измерения уровня частичных разрядов. Они возникают в местах с ослабленной газовыми включениями изоляцией. При их наличии в масляной прослойке, граничащей с твердой изоляцией, зачастую происходит ее повреждение и образование на поверхности изоляции устойчивых проводящих следов. Такие повреждения способны привести в конечном счете к полному пробое изоляции.

Внешний вид частичных разрядов, записанный высокоскоростной камерой, представлен на рис.1 [1].

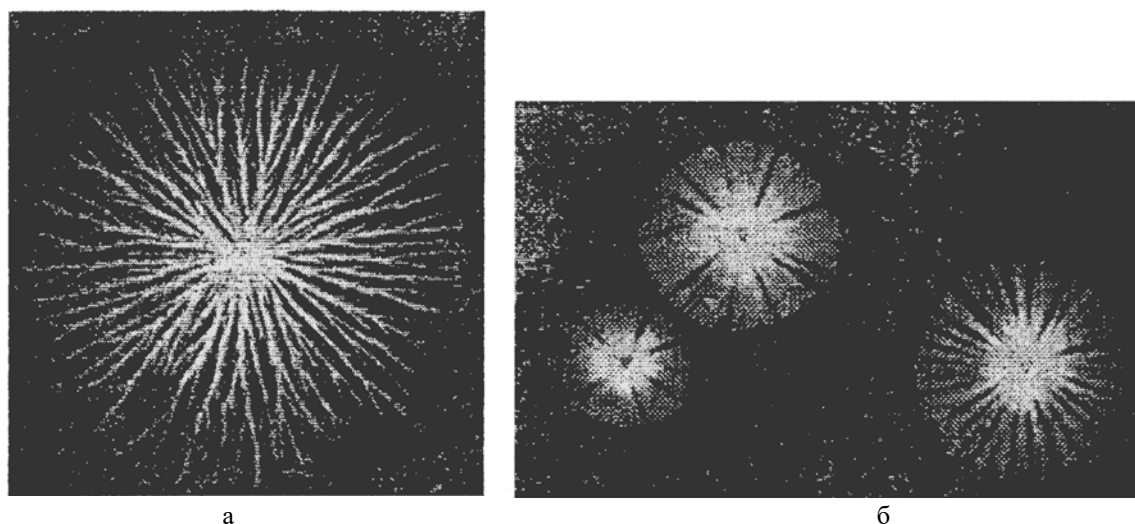


Рис. 1. Частичные разряды:

- а – поверхностный заряд с положительного электрода;
б – поверхностный заряд с отрицательного электрода

Среди известных методов регистрации частичных разрядов выделяются:

- электрический метод, который основан на измерении сигналов электрических цепей, связанных с контролируемым объектом;
- электромагнитный метод, при котором происходит дистанционная регистрация электромагнитного излучения частичных разрядов в СВЧ-диапазоне;
- оптический метод, основанный на дистанционной регистрации оптического излучения частичных разрядов;
- акустический метод, в основе которого лежит измерение звуковых колебаний, образующихся при частичных разрядах, при помощи специальных приборов контактного или дистанционного типа.

Из-за характера нагрузки для силовых трансформаторов, установленных на тяговых подстанциях, целесообразно применять метод акустико-эмиссионного контроля.

В электрооборудовании могут быть простые и сложные условия распространения ультразвука. «В высоковольтных вводах, измерительных трансформаторах, токопроводах обычно имеются простые условия распространения ультразвука, при которых звук от разряда распространяется в практически однородной среде на расстояния порядка сотни длин волн и поэтому затухает незначительно» [2].

В силовых трансформаторах, как и в элегазовых аппаратах, источник электрического разряда может находиться в глубине оборудования. «В этом случае ультразвук проходит ряд преград и значительно затухает. Если у небольших маслонаполненных объектов величина акустического сигнала практически одинакова в любой точке поверхности, то при обследовании силового трансформатора это отличие более значительно, и необходимо, перемещая датчик, искать область поверхности с максимальным сигналом» [3].

Наиболее вероятные амплитуды частичных разрядов используются при расчете координат дефекта. «Его возникновение происходит в местах с ослабленной газовыми включениями изоляцией. При их наличии в масляной прослойке, граничащей с твердой изоляцией, зачастую происходит ее повреждение и образование на поверхности изоляции устойчивых проводящих следов. Такие повреждения способны привести к полному пробою изоляции. Использование амплитудного анализа непрерывного сигнала способствует реализации данного метода локализации источника дефекта» [4].

«Известные на сегодняшний день методы решения задачи определения координат дефектов базируются на определении разности времени прихода сигналов акустической эмиссии, поступающих на датчики, с последующими вычислениями» [5]. «Считается, что на первый датчик сигнал акустической эмиссии пришел в момент времени t_1 , а на все остальные – t_2, t_3, t_4 . Неизвестные координаты дефекта обозначаются (x_0, y_0) . При расчете координат дефекта переходим от абсолютного времени t_i ($i=0..3$) к приведенному значению $t=t_i-t^*$, где t^* – время регистрации системой первого сигнала акустической эмиссии, от которого начинается отсчет разности времени прихода» [6]. При этом точка отсчета t_i переводится в начало координат. В соответствии с вышеизложенным составляется система уравнений:

$$\begin{cases} (t_1 - t_0) \cdot C = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}; \\ (t_2 - t_0) \cdot C = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2}; \\ (t_3 - t_0) \cdot C = \sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2}; \\ (t_4 - t_0) \cdot C = \sqrt{(x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2}. \end{cases} \quad (1)$$

где C – скорость распространения сигнала акустической эмиссии.

При этом предполагается, что длительность сигнала акустической эмиссии, поступающего из зоны радиусом R , не должна превышать:

$$\tau_i \leq \frac{2R}{C} \quad (2)$$

где R – радиус зоны контроля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью проведения диагностирования трансформатора акустическим методом к нему подключается оборудование согласно схеме (см. рис. 2). «От компьютера через специальную плату подключаются акустико-эмиссионные преобразователи, которые подключаются к объекту измерения» [7]. Также, с целью воздействия на объект контроля, к трансформаторному баку подключается имитатор акустической эмиссии (АЭ).

Особенностью проведенных экспериментов явилось сопоставление сигналов АЭ с временным сигналом потребляемой мощности силовых трансформаторов.

В большинстве случаев частичные разряды появлялись в моменты времени, соответствующие максимальной нагрузке.

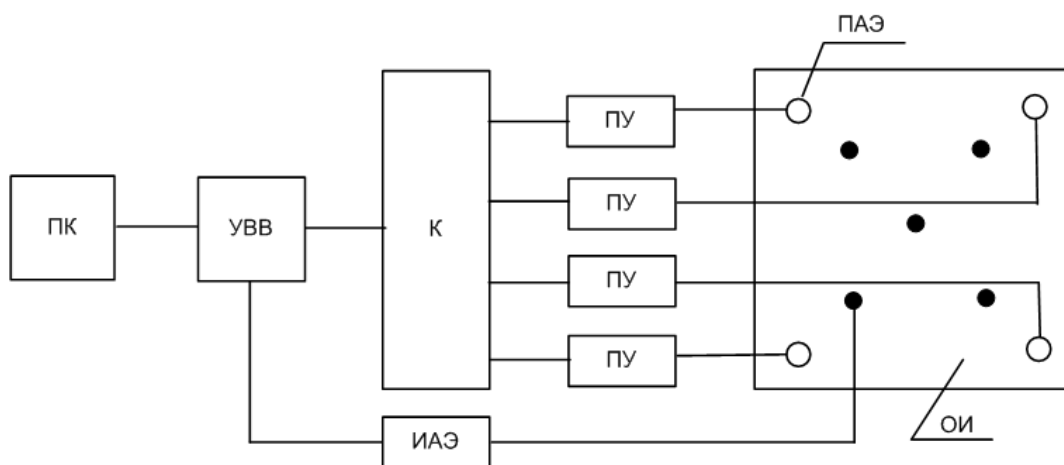


Рис. 2. Схема проведения эксперимента:

ПК – персональный компьютер; УВВ – устройство ввода-вывода; К – коммутатор; ПАЭ – преобразователи акустической эмиссии; ИАЭ – имитатор акустической эмиссии; ОИ – объект исследования

Характерная временная диаграмма, отображающая частоту и длительность частичных разрядов, представлена на рис. 3.

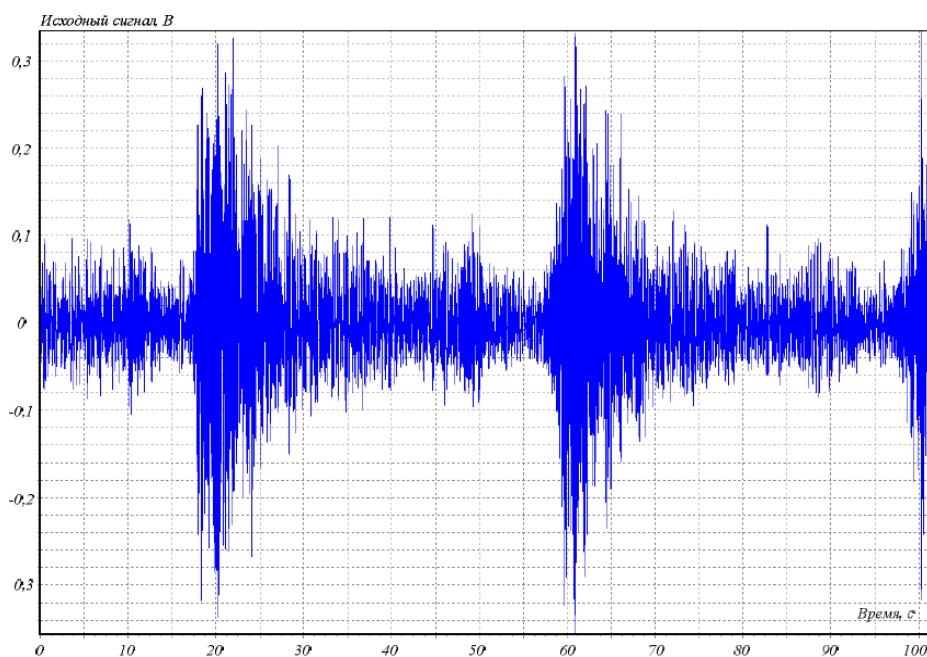


Рис. 3. Оциллограмма акустического сигнала

Результат анализа оциллограммы показывает, что по мере роста кажущегося заряда количество частичных разрядов уменьшается. Далее по полученным данным определяется распределение числа разрядов, проводится объемная локация идентификации зоны повышенной разрядной активностью, а также определяется форма разрядного явления.

Нагрузка трансформаторов тяговых подстанций носит резкопеременный характер. «В момент прохождения электроподвижного состава в определенной межподстанционной зоне происходит падение напряжения вместе

с возрастанием мощности и тока» [6]. На рис. 4 приведен график, отображающий изменение нагрузки тяговой подстанции, зарегистрированный ИВК «Омск» [8].

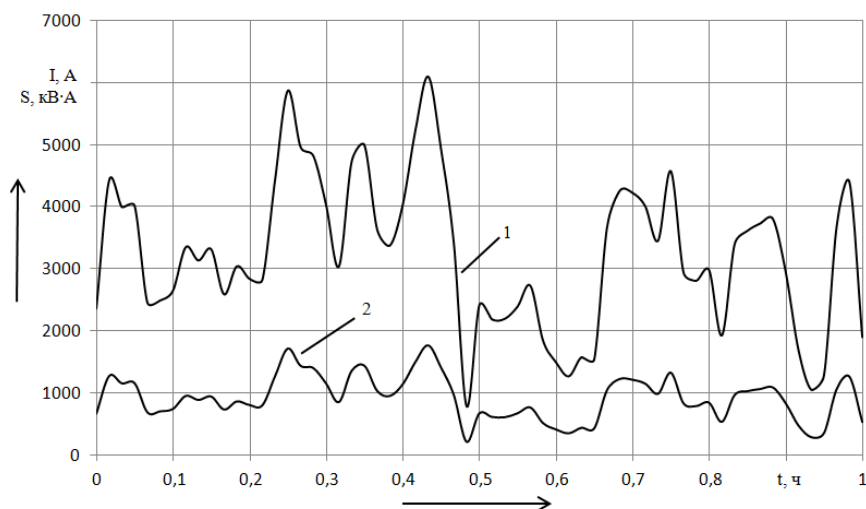


Рис. 4. Нагрузка трансформатора тяговой подстанции «Подволошная»: 1 – мощность; 2 – ток

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Акустический метод целесообразно применять на тяговых подстанциях. Резкие перепады напряжения оказывают существенное влияние на работоспособность трансформаторов. В отличие от трансформаторов электросетевого хозяйства в трансформаторах, эксплуатируемых в системе тягового электроснабжения, более отчетливо проявляются частичные разряды в момент прохождения поездов. Характер нагрузки железнодорожного транспорта существенно отличается от характера нагрузки районных потребителей. Это доказывает, что на подстанциях системы тягового электроснабжения целесообразно применять метод акустической локализации частичных разрядов с обнаружением координат нахождения предполагаемого дефекта. Для определения критических уровней нагрузки для различных видов тяговых трансформаторов планируется провести дальнейшие исследования.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования проведен анализ современных методов диагностики трансформаторов определены их достоинства и недостатки. Выявлено, что для трансформаторов тягового электроснабжения целесообразно применять метод акустического контроля. Метод акустической эмиссии позволяет эффективно оценивать состояние силовых трансформаторов в режиме коротких пиковых нагрузок при прохождении подвижного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахнин В. А., Мироненко Я. В. Использование нечеткой логики в электрошумовой диагностике высоковольтного оборудования // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / ОмГУПС, 2013. Омск, 2013. С. 424.
2. Zhao Xin De-noising of GIS UHF Partial Discharge Monitoring based on Wavelet Method // Procedia Environmental Sciences. 2011. No. 11. P. 1302.
3. Ji T. Y. Partial discharge location using a hybrid transformer winding model with morphology-based noise removal.
4. Цветаев С. К. Изоляция электрооборудования. Акустическая регистрация разрядных процессов // Новости электротехники. 2008. № 1 (48). С. 86.
5. Карандаев А. С., Евдокимов С. А., Девятков Д. Х., Парсункин Б. Н., Сарлыбаев А. А. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локализации частичных разрядов // Вестник МГТУ. 2012. № 1. С. 135.

6. Степанова Л. Н., Серьезнов А. Н., Ивлиев В. В. [и др.]. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций. Новосибирск: Наука, 2011. С. 272.
7. Система цифровая акустико-эмиссионная диагностическая СЦАД-16.02. Руководство по эксплуатации / СибНИИ авиации им. С. А. Чаплыгина. ФГУП, 2004. С. 51.
8. Черемисин В. Т., Ушаков С. Ю., Каштанов А. Л. Концепция единой автоматизированной системы учета электрической энергии на тягу поездов // Транспорт Урала. 2013. Вып. 4(39). С. 83–86.

УДК 620.17.05

ИЗМЕРЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА И ВЯЗКОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ СОБСТВЕННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЭМС-УСТРОЙСТВ

А. Н. Лепетаев, О. В. Кропотин, К. В. Мурасов, В. Ю. Шеин
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Физико-механические свойства материалов в значительной степени зависят от однородности структуры. В статье описан новый способ измерения механических свойств материалов, позволяющий с высокой точностью определить неоднородность структуры материала, в основе которого лежит измерение резонансной частоты колебаний пластины исследуемого материала с использованием МЭМС-актюатора и МЭМС-микрофона. Дано описание конструкции датчиков, приведена схема измерительной установки. Приведены результаты моделирования конструкции в программе FlexPDE, относительная погрешность формул в практически значимом диапазоне значений коэффициента Пуассона, а также текст программы расчета в среде FlexPDE.

Ключевые слова: модуль Юнга, МЭМС–датчики, резонансная частота, коэффициент Пуассона, измерительная установка.

I. ВВЕДЕНИЕ

Известны методы измерения характеристик механических свойств материалов, основанные на измерении времени прохождения модулированных акустических импульсов через пластину исследуемого материала. При этом в качестве излучателя и приемника используются пьезоэлектрические преобразователи с различной резонансной частотой, а сами измерения, как правило, производятся в иммерсионной среде.

При проведении измерений указанным методом необходимо учитывать следующие факторы:

- добротность пьезоэлектрических преобразователей влияет на время нарастания и спада формируемого радиоимпульса;
- свойства иммерсионной среды, которая, с одной стороны, влияет на величину нагруженной добротности преобразователей, а с другой – создает условия для возникновения дополнительных резонансов, связанных с переотражениями акустического сигнала в зазоре между преобразователем и пластиной исследуемого материала;
- измерение расстояния между излученным и отраженным импульсами производится по некоторому уровню, величина которого при разной крутизне фронтов этих импульсов будет влиять на результаты измерений.

Предлагается новый способ измерения характеристик механических свойств материалов, основанный на измерении собственной резонансной частоты колебаний пластины исследуемого материала без использования промежуточных иммерсионной среды и пьезоэлектрических преобразователей, вместо которых применены датчики, основанные на МЭМС-устройствах.

II. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА И УСТРОЙСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Конструкция используемых датчиков в упрощенном виде приведена на рис 1.

Конструкция датчиков, представленная на рис. 1, является осесимметричной; ось симметрии изображена пунктирной линией. Оба держателя имеют одинаковую конструкцию.

Держатели изготавливают из материала с большим значением модуля Юнга, например, из нитрида алюминия (AlN). Наружные стороны держателей имеют форму, при которой отсутствуют ярко выраженные резонансы в широком диапазоне частот. Между внутренними поверхностями держателей и пластиной 1 имеются зазоры. Внутренние плоские поверхности держателей имеют металлизацию, которая представляет собой обкладку конденсатора. Вторая обкладка образуется поверхностью пластины, которая также должна быть металлизирована.

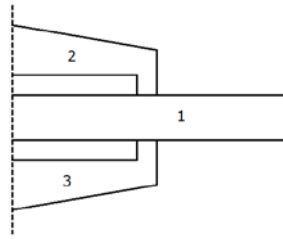


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции датчиков:

- 1 - пластина исследуемого материала,
- 2 - верхняя половинка держателя,
- 3 - нижняя половинка держателя

Принцип работы конструкции объединяет в себе МЭМС-актюатор с электростатическим приводом и МЭМС – микрофон. Использование принципов работы МЭМС – устройств в данном контексте, как будет показано далее, вполне уместен, несмотря на то, что размеры конструкции отнюдь не являются микроскопическими.

Металлическое покрытие пластины находится под нулевым потенциалом (заземлено), а на внутренние обкладки держателей подается одинаковое напряжение поляризации и синусоидальный измерительный сигнал.

Введем обозначения:

R_c – радиус внутренних полостей держателей, который является радиусом обкладок конденсаторов;

d_0 – расстояние между пластиной и внутренней поверхностью держателя;

E – модуль Юнга материала пластины;

ρ – плотность материала пластины;

μ – коэффициент Пуассона материала пластины;

η – коэффициент внутреннего трения материала пластины;

U_0 – постоянная составляющая напряжения, подаваемого на внутренние обкладки держателей (напряжение поляризации);

v – скорость звуковой волны в исследуемом материале.

P_t – толщина пластины;

$f_0 = v/(2 \cdot P_t)$ – частота акустического резонанса пластины;

f – частота внешнего сигнала возбуждения;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$.

$U(t) = U_0 + \Delta U \cdot \cos(\omega \cdot t)$ – напряжение возбуждения.

Если на обкладки возбуждения подать синусоидальное напряжение с амплитудой, равной $\Delta U = U_0$, то сила электростатического давления F_s на поверхность пластины будет равна:

$$F_s = \epsilon_0 \left(\frac{U_0}{d} \right)^2 \cdot 2 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Здесь не учитываются постоянная составляющая давления и вторая гармоника частоты возбуждения, поскольку они не могут возбудить акустические волны в пластине при $f \approx f_0$.

Схема измерительной установки при использовании данной конструкции приведена на рис. 2.

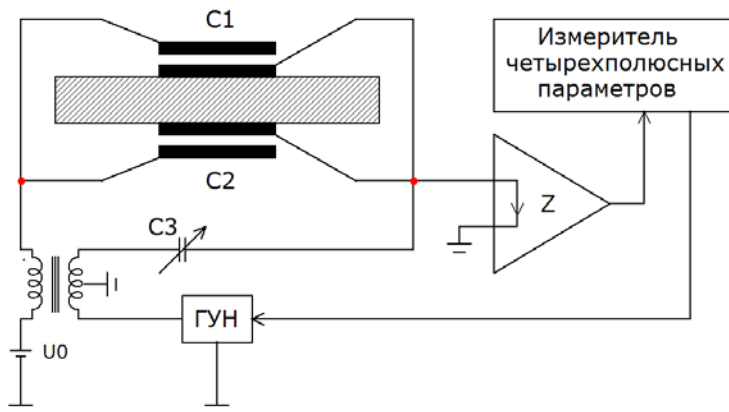


Рис. 2. Схема измерительной установки

Конденсаторы $C1$ и $C2$ – это емкости верхнего и нижнего держателей соответственно. Для обеспечения симметрии распространения звуковой волны и подавления изгибных колебаний пластины эти емкости должны быть равными, т.е. должно выполняться условие: $C1 = C2 = C0$. Если это условие по каким-то причинам не выполняется (например, в силу искривления исследуемой пластины), то в конструкции держателей можно предусмотреть специальные отверстия, через которые с помощью управляемых регуляторов давления закачивается воздух, что позволит производить регулировку зазора вплоть до обеспечения требуемого условия равенства емкостей.

Перестраиваемый конденсатор $C3$ необходим для компенсации неинформативной составляющей емкостного тока. Его величина с высокой точностью должна удовлетворять условию: $C3 = C1 + C2$. В этом случае ток, текущий через этот конденсатор, равен по амплитуде и противоположен по фазе току, текущему через конденсаторы $C1$ и $C2$. В этом случае на вход усилителя Z попадает только та составляющая емкостного тока, которая связана с изменениями зазора конденсаторов $C1$ и $C3$, вызванными изменениями толщины пластины при распространении звуковой волны. Настройки емкостей $C1 \dots C3$ являются подготовительными операциями по начальной настройке измерительной установки.

Усилитель Z является усилителем с токовым входом и имеет близкое к нулю входное сопротивление.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование конструкции и решение соответствующей осесимметричной задачи производились в программе FlexPDE. Так как распределение звуковой волны вдоль толщины пластины симметрично относительно медианной плоскости пластины, геометрическая модель разрабатывалась только для верхней половины пластины.

Для удобства расчетов в программе задавалась частота резонанса $f0$, а толщина пластины вычислялась по формуле: $Pt = v/(2 \cdot f0)$. При этом скорость волны вычислялась по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

Эта формула верна для случая, когда диаметр держателей много больше длины акустической волны (в данном случае это удвоенная толщина пластины).

Следует заметить, что в большинстве методик расчета фигурирует упрощенная формула:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

которая верна для стержней (т.е. когда волна распространяется по волноводу, краями которого является боковая поверхность стержня). Для волны в плоской пластине эта формула дает заниженные значения скорости.

На рис. 3 приведен график зависимости относительной погрешности использования указанных формул (в процентах) в практически значимом диапазоне значений коэффициента Пуассона.

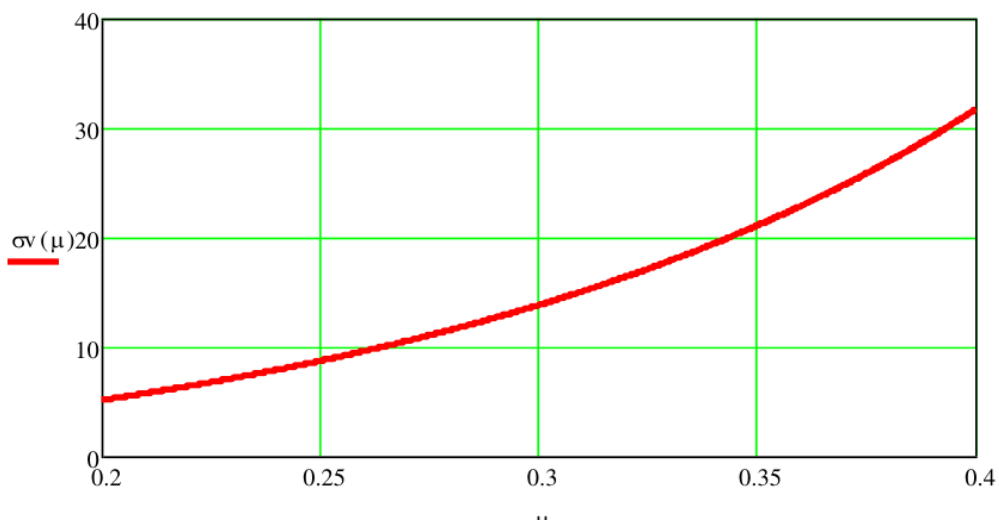


Рис. 3. Относительная погрешность вычисления скорости для приведенных формул (в процентах)

Из этого графика видно, что при малых значениях коэффициента Пуассона относительная погрешность формул сравнительно невелика (не превышает 10 % до значений $\mu = 0.26$).

Далее задавался диапазон частот вблизи f_0 и производился расчет сигнального тока через обкладки держателей. Механическое воздействие на поверхность пластины задавалось в пределах внутренней полости держателей как механическое давление величиной F_s .

Расчет производился со следующим набором параметров, приведенным в табл. 1.

ТАБЛИЦА I
НАБОР ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РАСЧЕТА

Rc	1 см	E	16 МПа	μ	0.27	ρ	2500
η	10	U0	100 В	d0	0.1 мм	f0	10 кГц

Текст программы расчета приведен в разделе IV.

Результаты расчетов приведены на рис. 4 и 5.

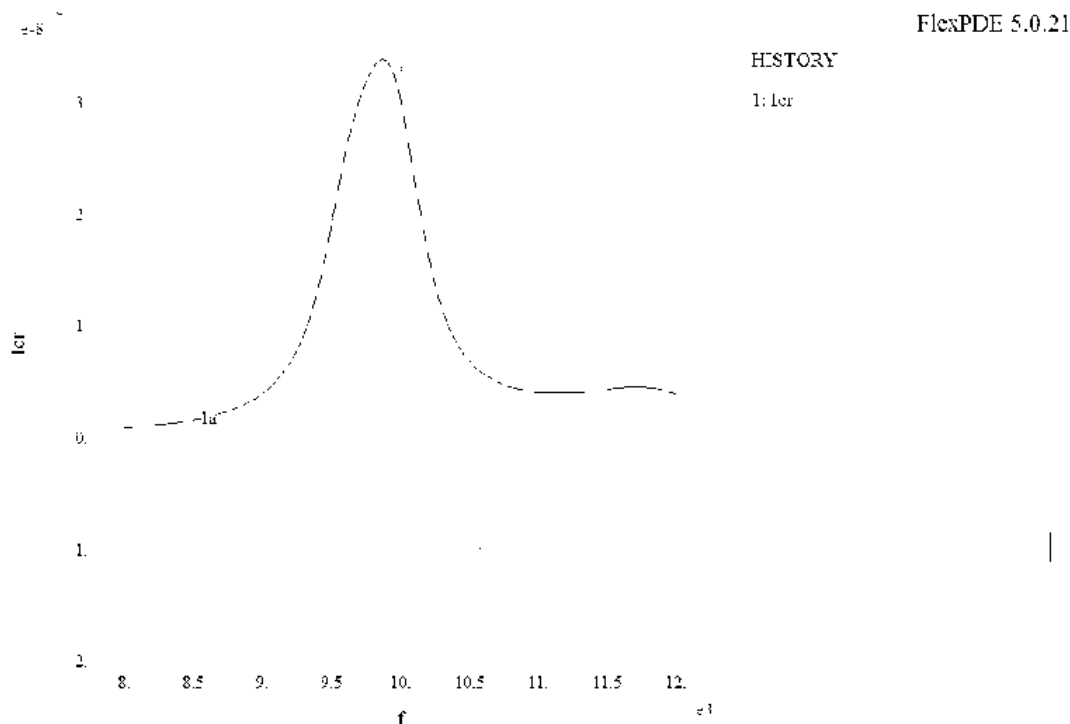


Рис. 4. АЧХ конструкции:

1 – реальная часть силы тока, 2 – амплитуда силы тока, 3 – мнимая часть силы тока

Как видно из рис. 4, погрешность расчета частоты резонанса составляет около -1.5 %. При использовании упрощенной формулы для скорости волны погрешность расчета составляет около 11 %.

Амплитуда силы тока одного держателя, как видно из рис. 4, составляет 34 нА. Суммарная сила тока двух держателей будет равна 68 нА, что является вполне измеримой величиной при использовании современных измерительных приборов.

При моделировании конструкции известными параметрами являются плотность материала и толщина пластины. Для того чтобы определить модуль Юнга, коэффициент Пуассона и коэффициент внутреннего трения можно использовать алгоритмы оптимизации. Ниже, в табл. 2 приведены значения чувствительности частоты резонанса от величины модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

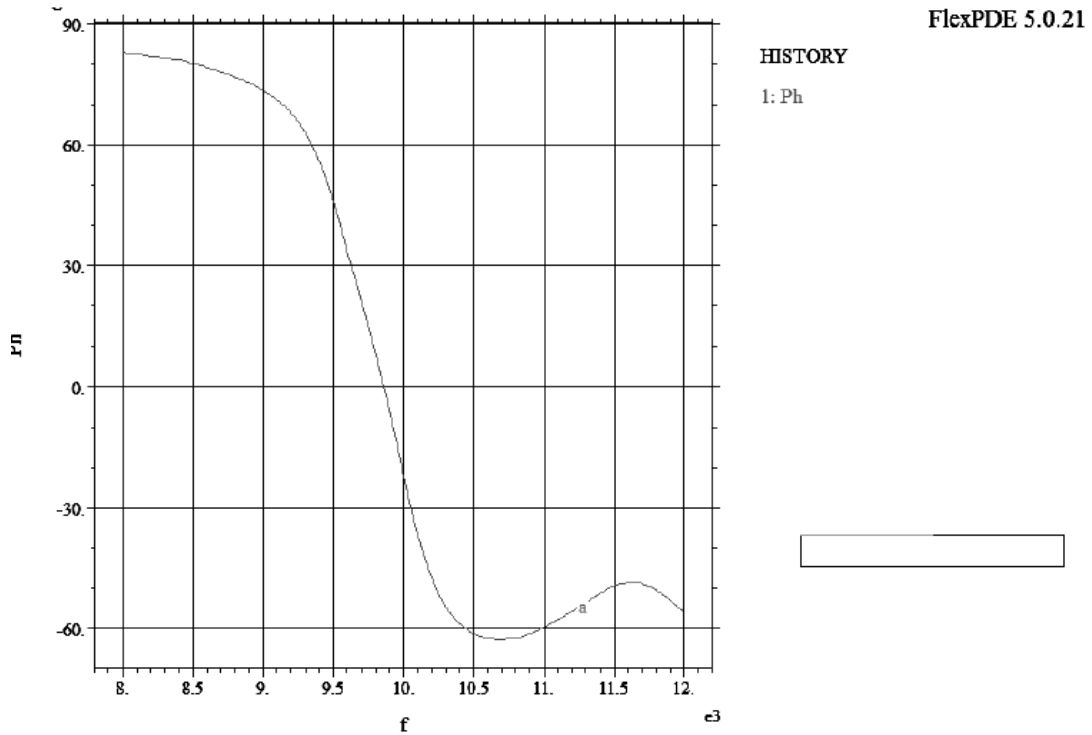


Рис. 5. ФЧХ конструкции

ТАБЛИЦА 2

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ РЕЗОНАНСА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ
МОДУЛЯ ЮНГА И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА

E – 10%	E + 10 %	μ – 10 %	μ + 10 %
f – 5.5 %	f + 5.5 %	f – 2.5 %	f + 3.5 %

Чувствительность частоты резонанса к коэффициенту внутреннего трения весьма мала и в работе не исследовалась.

ФЧХ на рис. 5 позволяет определить величину добротности резонанса (через крутизну ФЧХ), что, в свою очередь, позволяет производить подбор значения коэффициента внутреннего трения.

VI. ТЕКСТ ПРОГРАММЫ

Ниже приведен текст программы расчета для среды FlexPDE

```
TITLE 'Young module'
COORDINATES uycylinder
VARIABLES
    Urr, Uzr
    Uri, Uzi
definitions
    n_stages = 100;
SELECT
    errlim = 1e-3
    nodelimit = 15000
    stages = n_stages
DEFINITIONS
    eps0 = 8.854188e-12;
    Rr = 2e-2; ! model radius
    Rc = 1e-2; ! capacitance radius
```



```

E0 = 16e6; ! Young module of plate
mu0 = 0.27 ! Poisson ratio for plate
rho = 2.5e3; ! Plate dehsity
U0 = 100; ! Polarization voltage
d0 = 0.1e-3; ! capacitor gap width
sigma0 = 10; ! plate internal loss
f0 = 10e3;
v = sqrt(E0*(1-mu0)/(rho*(1+mu0)*(1-2*mu0)));
E = E0*1;
mu = mu0*1;
sigma = sigma0*1;
Pt = v/(2*f0); ! plate thickness
Pt2 = Pt/2;
Fs = eps0*2*(U0/d0)^2;
rrr = dr(Urr);
rzz = dz(Uzz);
rsr = dr(Uzz) + dz(Urr);
rtr = Urr/r;
rri = dr(Uri);
rzi = dz(Uzi);
rsi = dr(Uzi) + dz(Uri);
rti = Uri/r;
k = E/((1+mu)*(1-2*mu));
c11 = (1-mu)*k;
c12 = mu*k;
c13 = c12;
c22 = c11;
c23 = c12;
c33 = c11;
c44 = 0.5*E/(1+mu);
trr = c11*rrr + c12*rzz + c13*rtr;
tzz = c12*rrr + c22*rzz + c23*rtr;
ttr = c13*rrr + c23*rzz + c33*rtr;
tsr = c44*rsr;
tri = c11*rri + c12*rzi + c13*rti;
tzi = c12*rri + c22*rzi + c23*rti;
tti = c13*rri + c23*rzi + c33*rti;
tsi = c44*rsi;
fbeg = f0*0.8;
fend = f0*1.2;
delta_f = (fend - fbeg)/2;
f = f0 - delta_f + 2*(stage - 1)*delta_f/(n_stages - 1);
omega = 2*pi*f;
omega2 = omega^2;
Uzm = sqrt(Uzz^2 + Uzi^2);
Urm = sqrt(Urr^2 + Uri^2);
lcm = sintegral(eps0*U0*omega*Uzm/d0^2, 'Plate');
lcr = sintegral(eps0*U0*omega*Uzi/d0^2, 'Plate');
lci = sintegral(eps0*U0*omega*Uzz/d0^2, 'Plate');
Phase = 180*atan2(lci, lcr)/pi;
Ph = if Phase < 250 then Phase else Phase - 360

```

EQUATIONS

```

Urr: div(vector(trr, tsr)) + rho*omega2*Urr + omega*sigma*del2(Uri) = ttr/r
Uzz: div(vector(tsr, tzz)) + rho*omega2*Uzz + omega*sigma*del2(Uzi) = 0
Uri: div(vector(tri, tsi)) + rho*omega2*Uri - omega*sigma*del2(Urr) = tti/r
Uzi: div(vector(tsi, tzi)) + rho*omega2*Uzi - omega*sigma*del2(Uzz) = 0

```

BOUNDARIES

REGION 1

START(0,0)

Load(Urr) = 0 Load(Uri) = 0

Value(Uzr) = 0 Value(Uzi) = 0

LINE TO (Rr, 0)

Load(Uzr) = 0 Load(Uzi) = 0

Load(Urr) = 0 Load(Uri) = 0

Line to (Rr, Pt2)

Load(Uzr) = 0 Load(Uzi) = 0

Load(Urr) = 0 Load(Uri) = 0

Line to (Rc, Pt2)

load(Urr) = 0 load(Uri) = 0 load(Uzr) = Fs load(Uzi) = 0

line to (0, Pt2)

Value(Urr) = 0 Value(Uri) = 0 load(Uzr) = 0

Line to close

Feature 'Plate'

Start(0, Pt2) Line to (Rc, Pt2)

PLOTS

Histories

history(Icr, Icm, Ici) versus f !black

history(Ph) versus f

END

V. ВЫВОДЫ

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренная конструкция позволяет производить измерения резонансной частоты и далее путем подбора параметров в программе моделирования с использованием алгоритмов оптимизации определить характеристики механических свойств исследуемого материала.

2. Исключение из конструкции резонансных преобразователей и иммерсионной среды, а также переход от измерения временных интервалов к измерению резонансных частот позволяет повысить точность вычислений.

3. Сочетание расчетных (конечноэлементный анализ) и экспериментальных методов исследования позволит повысить точность определения параметров.

Следует отметить, что предложенный метод измерений не лишен недостатков. Во-первых, требуется металлизация поверхности пластины, во-вторых, для обеспечения нужной величины зазора требуется высокое качество обработки поверхности. Для некоторых материалов (например, политетрафторэтилена) обеспечить металлизацию поверхности образца проблематично. В этом случае в конструкцию держателей можно ввести специальную тонкую металлизированную пленку, которая будет прилегать к поверхности материала. Для плотного прилегания пленки к материалу и исключения прилипания ее к другому электроду внутри полости держателей необходимо создавать избыточное давление, превышающее возможные силы электростатического притяжения. Одновременно регулирование внутреннего давления будет являться инструментом балансировки статических емкостей держателей, как было описано выше в процедуре калибровки системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Truell R. C., Elbaum, B. B. Chick. Ultrasonic methods in Solid State Physics. New-York: Academic press, 1969. 450 p.
2. Косых А. В., Лепетаев А. Н., Одинец А. И. МЭМС: инерциальные системы, микроактюаторы, датчики [Электронный ресурс] : учеб. электрон. изд. локального распространения: учеб. пособие; ОмГТУ. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
3. Кропотин О. В. Преобразователь изменения временной задержки ультразвукового сигнала в твердых телах в амплитуду / О. В. Кропотин, Е. Н. Булатов, В. И. Суриков // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 4. С. 192–194.
4. Богуш М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. М.: Техносфера, 2014. 312 с.

УДК 621.373.5

СНИЖЕНИЕ ШУМОВ В ГЕНЕРАТОРАХ С ИМПУЛЬСНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ НА ПРИМЕРЕ ГЕНЕРАТОРА КОЛПИЦА

А. Н. Лепетаев, А. В. Косых, С. А. Завьялов, К. В. Мурасов, Р. Р. Фахрутдинов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В статье выведены формулы, позволяющие на основе импульсного представления сигнала на выводах кварцевого резонатора определить влияние каждого импульса на приращение амплитуды и фазы тока резонатора. На основе этих формул показано, что оптимальный режим работы активных элементов – это режим формирования коротких импульсов в моменты времени, соответствующие экстремуму тока резонатора. В работе рассматривается взаимосвязь между фазой импульса возбуждения и уровнем фазовых и амплитудных шумов кварцевого генератора Колпица. Приводятся рекомендации по проектированию генераторов с низким уровнем фазовых шумов.

Ключевые слова: кварцевый генератор, низкий уровень шумов, схема возбуждения, компьютерное моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Известно множество схем возбуждения кварцевых резонаторов, например, схема Колпица, схема Пирса, схема Батлера и т.п. На практике часто используется схема Колпица. Она проста, не содержит индуктивностей и обладает неплохими шумовыми свойствами. Но у неё есть недостаток – довольно большое реактивное сопротивление, что в некоторых случаях создает неудобство ее использования. Впрочем, недостатки есть у всех схем возбуждения, иначе все использовали бы какую-то одну схему, не имеющую недостатков.

С точки зрения пользователя, схема возбуждения кварцевого резонатора должна решать следующие задачи:

1. Обеспечивать регенерацию тока резонатора и поддерживать его величину на заданном уровне.
2. По возможности не вносить флуктуаций в фазу тока резонатора.
3. Не ухудшать фильтрующую способность кварцевого резонатора, т.е. обеспечивать как можно большую величину нагруженной добротности резонатора.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим влияние схемы возбуждения на поведение кварцевого резонатора. Статическую емкость резонатора будем считать элементом схемы возбуждения. За время, соответствующее одному периоду колебаний, в силу очень большой добротности резонатора будем пренебрегать отклонением тока резонатора от чистой синусоиды. За начало отсчета времени примем момент, когда ток динамической ветви эквивалентной схемы кварцевого резонатора проходит через максимум:

$$Iq(t) = I_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

Напряжение $V(t)$, создаваемое схемой возбуждения на выводах резонатора, представим ступенчатой функцией времени как совокупность коротких импульсов длительностью τ :

$$V(t) \approx V \left(\tau \cdot \text{ceil} \left(\frac{t}{\tau} \right) \right) \quad (2)$$

Здесь $\text{ceil}(x)$ – функция округления аргумента x до ближайшего целого числа.

При стремлении τ к нулю выражение (2) соответствует представлению сигнала через δ – импульсы.

Рассмотрим действие одиночного импульса из (2) на ток резонатора. Введем обозначение:

$$Vt = Vp \cdot \tau \quad (3)$$

Здесь $Vp = V(Tp)$, где Tp – сдвиг центра рассматриваемого одиночного импульса от начала координат по времени.

Если длительность импульса τ много меньше периода колебаний T ($\tau \ll T$), то приращение тока, создаваемое действием этого импульса на колебательный контур, можно получить из известной формулы для импульсной характеристики:

$$\delta I = I_p \cdot [a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t)] \quad (4)$$

Гдет $a = \cos(\omega \cdot T_p)$, $b = \sin(\omega \cdot T_p)$, (5)

$$I_p = \frac{V_t \cdot \omega}{R_q \cdot Q} = \frac{2\pi \cdot V_p \cdot \tau}{R_q \cdot Q \cdot T} \quad (6)$$

Полный ток после действия импульса в силу линейности модели резонатора равен суперпозиции исходного тока и приращения:

$$\begin{aligned} I_{q1}(t) &= I_q(t) + \delta I(t) \Rightarrow \\ &= (I_0 + I_p \cdot a) \cdot \cos(\omega \cdot t) + I_p \cdot b \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) содержит две ортогональные компоненты. Представим это через модуль вектора и его фазу:

$$I_{q1}(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \Delta\varphi), \quad (8)$$

где

$$A = \sqrt{(I_0 + I_p \cdot \cos(\omega \cdot T_p))^2 + (I_p \cdot \sin(\omega \cdot T_p))^2}, \quad (9)$$

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{I_p \cdot \sin(\omega \cdot T_p)}{I_0 + I_p \cdot \cos(\omega \cdot T_p)}\right) \quad (10)$$

Оценим величину I_p из выражения (6). Максимальное значение длительности импульса равно половине периода колебаний ($\tau = T/2$). Пусть $R_q = 20$, $Q = 3 \cdot 10^5$, тогда при напряжении импульса V_p порядка 1 вольта величина I_p составит около 0.6 мкА. Это значительно меньше типовых значений тока резонатора в стационарном режиме, которое составляет величину порядка нескольких миллиампер. Поэтому приращение тока в выражении (9) можно получить из разложения в ряд Тейлора, в котором отброшены члены второго порядка малости:

$$\Delta I = A - I_0 = I_p \cdot \cos(\omega \cdot T_p) = \frac{2\pi \cdot V_p}{R_q \cdot Q} \cdot \frac{\tau}{T} \cdot \cos(\omega \cdot T_p) \quad (11)$$

Аналогично, отбрасывая члены второго порядка малости, получаем выражение для приращения фазы:

$$\Delta\varphi = \frac{I_p}{I_0} \cdot \sin(\omega \cdot T_p) = \frac{2\pi \cdot V_p \cdot \tau}{I_0 \cdot R_q \cdot Q \cdot T} \cdot \sin(\omega \cdot T_p) \quad (12)$$

Приращение фазы (12), создаваемое импульсом в каждом периоде колебаний, создает относительное отклонение частоты, равное:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{V_p \cdot \sin(\omega \cdot T_p)}{I_0 \cdot R_q \cdot Q} \cdot \frac{\tau}{T} \quad (13)$$

Из (12) и (13) следует, что отклонение фазы и соответствующее отклонение частоты будут равны нулю для импульсов, действующих в моменты времени

$$T_p = \frac{k \cdot \pi}{\omega} = \frac{k \cdot T}{2}, \quad (14)$$

где $k = 0, 1$. Здесь T – период колебаний тока резонатора.

Из (11) следует, что моменты времени (14) также соответствуют максимальным значениям приращения амплитуды тока. Это означает, что эти моменты времени являются наилучшими с точки зрения реализации идеального генератора, поскольку позволяют обеспечивать наиболее эффективную регенерацию тока без влияния на частоту собственных колебаний резонатора.

Конечно, при рассмотрении всего сигнала генератора необходимо суммировать вклады от всех составляющих напряжения из выражения (2). Тогда можно записать:

$$\Delta I = \frac{2\pi}{Rq \cdot Q \cdot T} \cdot \int_0^T V(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) dt \quad (15)$$

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{I_0 \cdot Rq \cdot Q \cdot T} \cdot \int_0^T V(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) dt \quad (16)$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{I_0 \cdot Rq \cdot Q \cdot T} \cdot \int_0^T V(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) dt \quad (17)$$

Возможны такие зависимости напряжения генератора от времени, при которых выражения (16) и (17) будут обращаться в 0, обеспечивая при этом ненулевое значение выражения (15). Такой генератор также сможет обеспечивать регенерацию тока при нулевом значении отклонения частоты. Однако необходимо помнить о том, что, кроме сигнала генератора $V(t)$, на выводах резонатора присутствует шумовое напряжение, создаваемое схемой возбуждения. Это шумовое напряжение будет создавать случайные флуктуации выражения (16), что приводит к возникновению фазовых шумов.

Поскольку нам необходимо обеспечить минимальные фазовые шумы, то следует минимизировать шумовое напряжение в моменты времени, не соответствующие выражению (14). Отсюда следует, что схема возбуждения должна создавать короткие импульсы возбуждения в моменты времени (14), а в остальные моменты времени должна обеспечивать замыкание выводов резонатора на общий провод. В этом случае фазовые шумы схемы будут минимальными. Таким образом, наиболее полезно активную часть работы генератора концентрировать по времени к моментам времени, задаваемым выражением (14). Из сопоставления требований к схеме возбуждения и полученных выражений следует вывод, что идеальный генератор – это генератор с импульсным возбуждением, обеспечивающий режим короткого замыкания резонатора во все моменты времени, кроме точек экстремума тока, где схема возбуждения формирует короткие ($\tau \ll T/2$) импульсы напряжения.

Следует заметить, что из выражения (16) не следует, что напряжение на выводах резонатора всегда (кроме, естественно, моментов времени, задаваемых выражением (14)) должно равняться нулю. Из него только следует, что активная фаза работы схемы возбуждения (когда транзисторы находятся в активном режиме и создают шумовое напряжение) должна быть сконцентрирована вблизи моментов времени, задаваемых выражением (14). В остальные моменты времени напряжение может создаваться реактивными элементами схемы, не создающими собственных шумов.

Рассмотрим, как в этом плане обстоит дело в генераторе Колпица.

Рассмотрим типовую схему Колпица, изображенную на рис. 1.

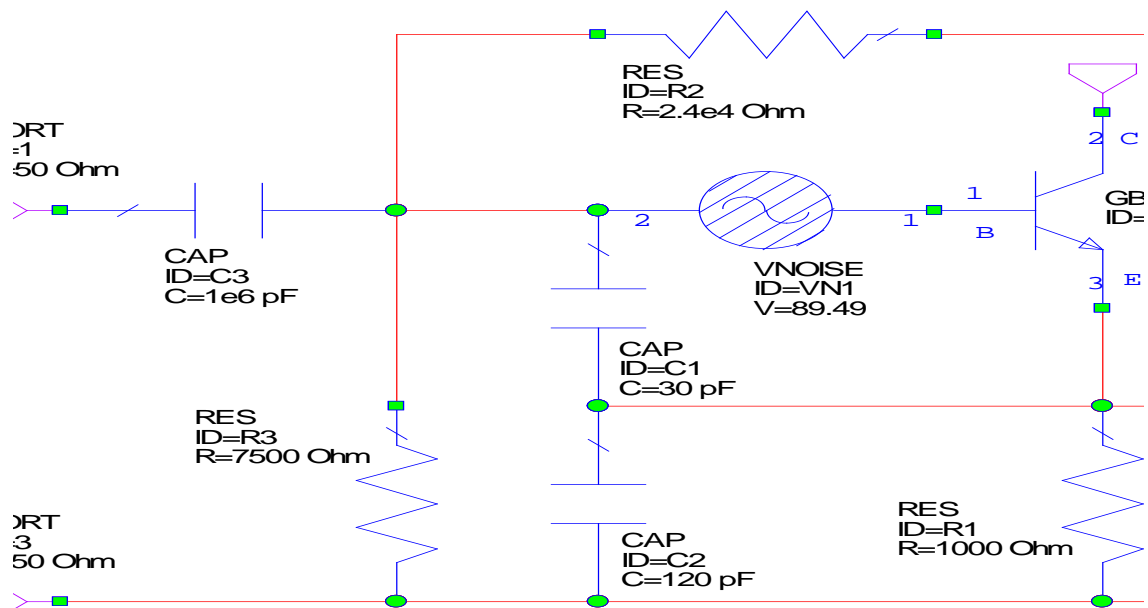


Рис. 1. Исследуемая схема Колпица

На этом рисунке на вход транзистора добавлен источник шумового напряжения VN1 величиной 89.5 нВ/Гц^{0.5}, что соответствует шумовому напряжению резистора величиной 5 кОм. Это сделано для более наглядного представления результатов шумового анализа.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 приведена схема измерения первой гармоники входного сопротивления схемы возбуждения от тока резонатора.

Идеальный трансформатор X1 на этой схеме служит для настройки точки баланса амплитуд, чтобы в этой и альтернативной схемах ток возбуждения резонатора был одинаковым.

Конденсатор C1 моделирует статическую емкость кварцевого резонатора.

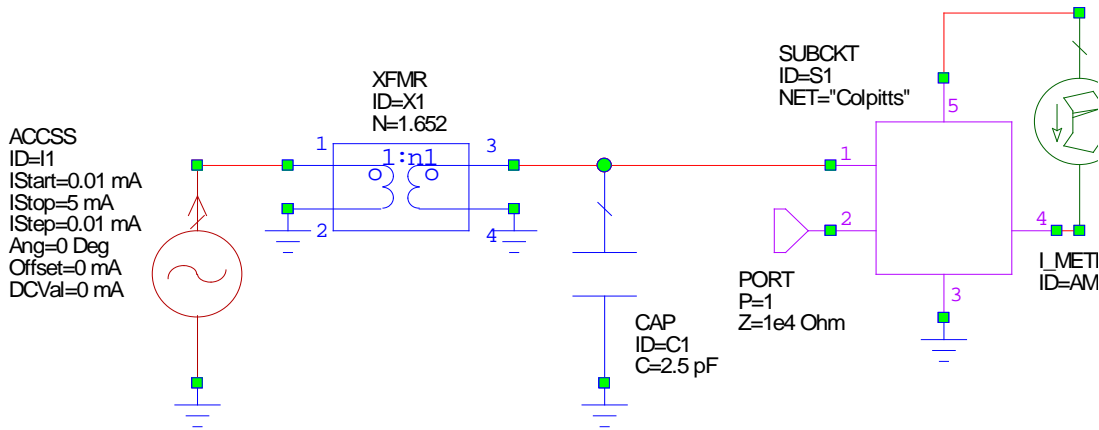


Рис. 2. Схема измерения первой гармоники входного сопротивления схемы возбуждения от амплитуды тока резонатора

На рис. 3 приведен результат измерения реальной (сплошная линия, левая шкала) и мнимой части (пунктирная линия, правая шкала) входного сопротивления схемы возбуждения от тока резонатора.

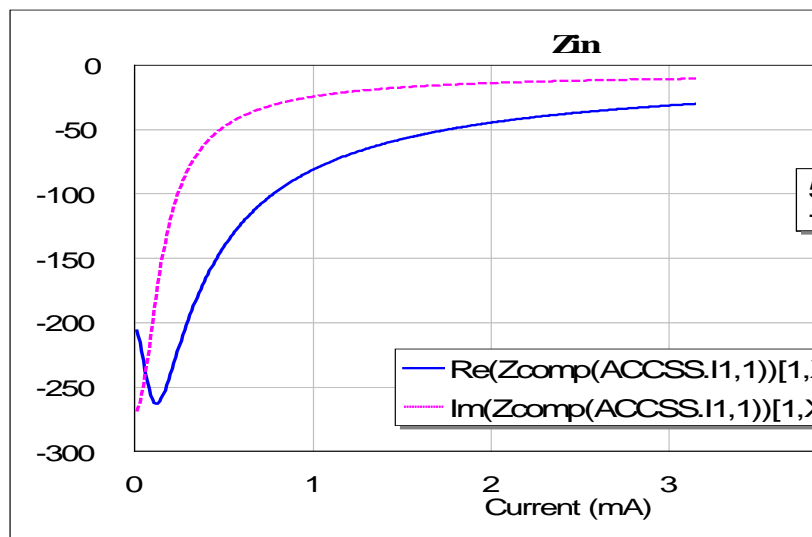


Рис. 3. Зависимость входного сопротивления стандартной схемы возбуждения от тока резонатора

Как видно из этого рисунка, при токе резонатора 5 мА активное сопротивление схемы возбуждения соответствует активному сопротивлению резонатора (20 Ом). Этому удалось добиться подбором коэффициента трансформации идеального трансформатора X1 (рис. 2).

На рис. 4 приведены осциллограммы тока коллектора транзистора (сплошная линия, левая шкала) схемы возбуждения и тока резонатора (пунктирная линия, правая шкала).

Из рис. 4 следует, что генератор Колпица фактически является генератором с импульсным возбуждением. Шумы схемы возбуждения в основном проявляются только в активной фазе работы транзистора, когда течет

ток коллектора. В остальные моменты времени транзистор закрыт и не создает шумов, и шумовое напряжение создается только резисторами в цепи смещения и источником питания. Напряжение на большей части периода создается реактивными компонентами схемы (конденсаторами), которые не создают шумов. Однако, как можно заметить из рис. 4, расположение импульса тока транзистора (активная фаза работы схемы возбуждения) не соответствует оптимальному, поскольку не соответствует моменту максимума тока резонатора. Поэтому широко распространенная схема Колпица не является вполне удачной схемой с точки зрения фазовых шумов.

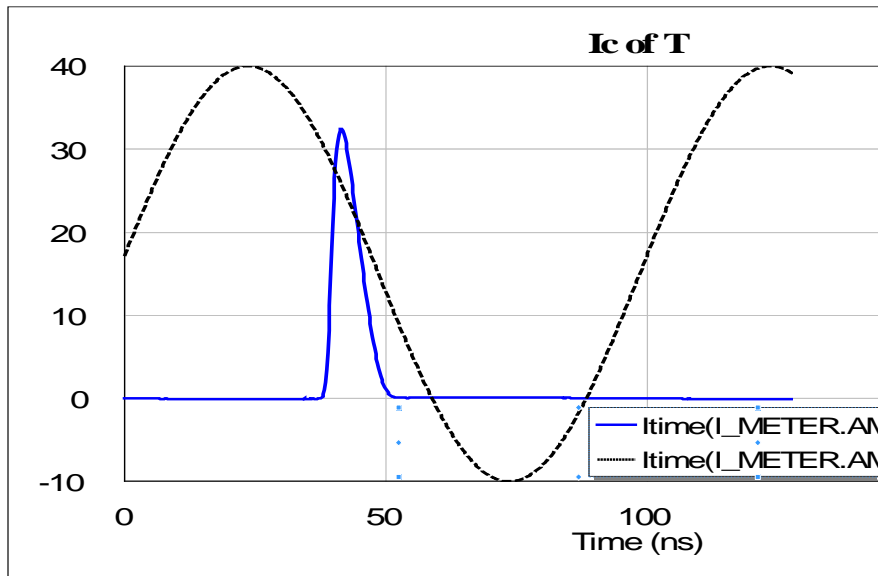


Рис. 4. Взаимное расположение тока резонатора (пунктирная линия) и тока коллектора транзистора схемы Колпица

Рассмотрим альтернативную схему возбуждения, в которую добавим идеальные фазовращательные элементы, как показано на рис. 5.

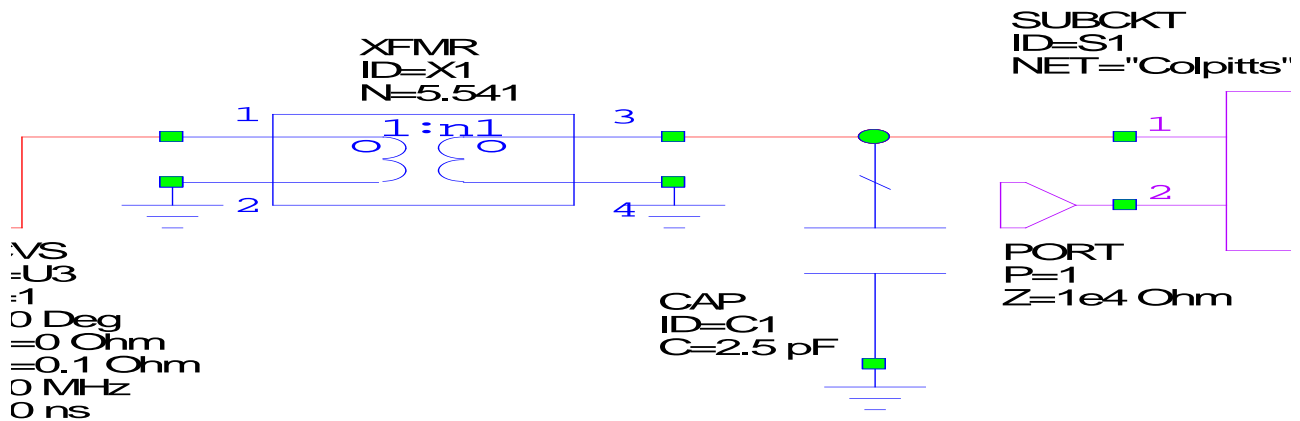


Рис. 5. Схема измерения первой гармоники входного сопротивления схемы возбуждения от амплитуды тока резонатора в альтернативной схеме с фазовращателями

На этом рисунке U_2 – источник тока, управляемый током, который вносит задержку в фазу выходного сигнала. В данном случае эта задержка равна 30 нс. Таким образом, ток резонатора поступает на вход схемы возбуждения с задержкой 30 нс, в то время как напряжение со входа схемы возбуждения поступает на вход резонатора через элемент U_3 (источник напряжения, управляемый напряжением) без всякой задержки. Идеальный трансформатор X_1 присутствует здесь с той же целью, что и в схеме на рис. 2.

На рис. 6 приведен результат измерения реальной (сплошная линия, левая шкала) и мнимой части (пунктирная линия, правая шкала) входного сопротивления альтернативной схемы возбуждения от тока резонатора. Как видно из этого рисунка, при токе резонатора 5 мА активное сопротивление схемы возбуждения соответствует

активному сопротивлению резонатора (20 Ом). Этого удалось добиться подбором коэффициента трансформации идеального трансформатора X1(рис. 5).

Из рис. 6 видно, что реактивное сопротивление схемы возбуждения в рабочей точке имеет существенное более низкое значение по сравнению со стандартной схемой, и становится индуктивным.

На рис. 7а и 7б приведены осциллограммы токов коллектора (7а) и входных напряжений (7б) стандартной (линии с кружочками) и альтернативной схем (линии с крестиками). Ток резонатора на обоих графиках изображен пунктирной линией. Для того, чтобы импульсы имели одинаковую амплитуду, трансформаторы из схемы были исключены.

Из этих рисунков видно, что цепи фазового сдвига в альтернативной схеме работают корректно.

Результаты измерений спектральной плотности мощности фазового и амплитудного шума рассмотренных схем приведены на рис. 8.

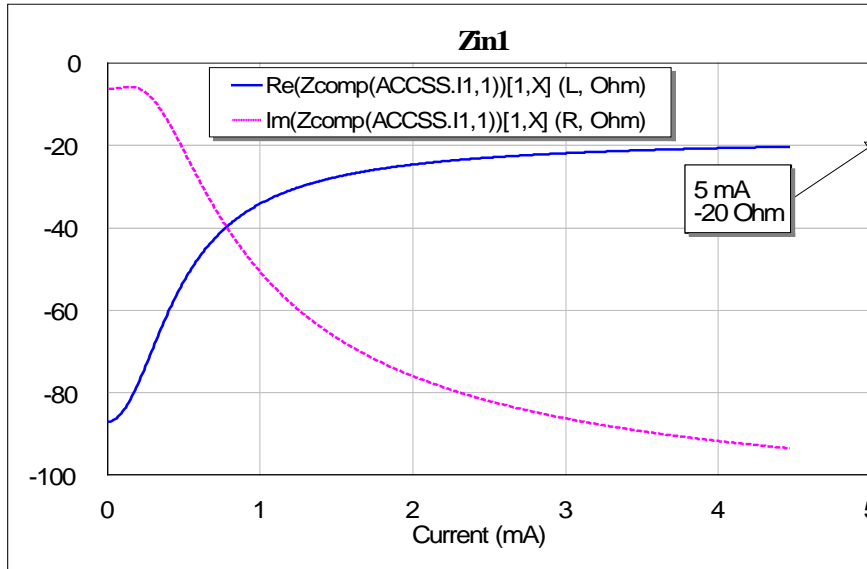


Рис. 6. Зависимость входного сопротивления альтернативной схемы возбуждения от тока резонатора

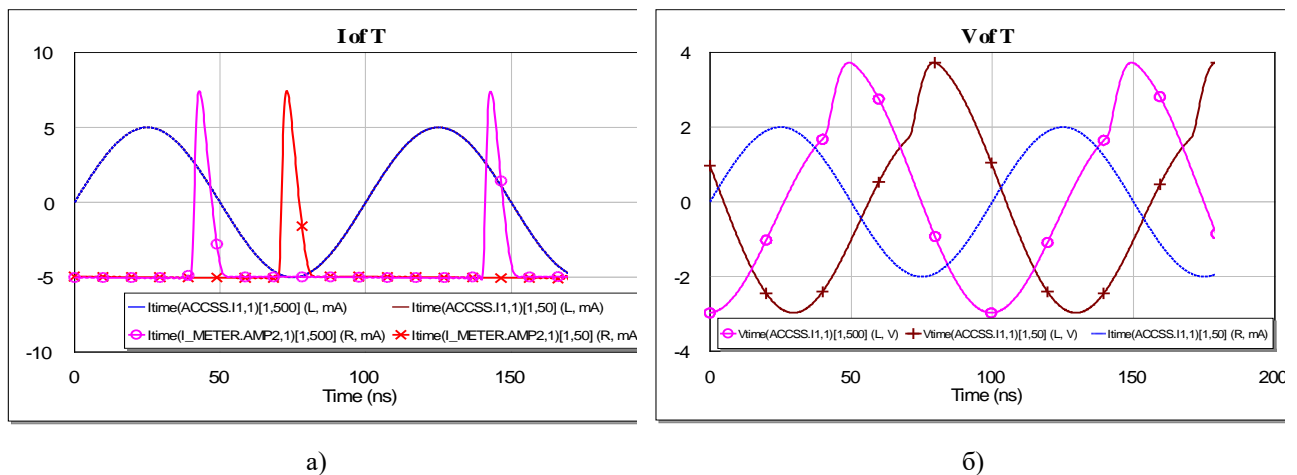


Рис. 7. Осциллограммы: а) –токов коллектора стандартной (кружочки) и альтернативной (крестики) схем; б) –входных напряжений стандартной (кружочки) и альтернативной (крестики) схем

Из рис. 8 видно, что фазовые шумы альтернативной схемы меньше шумов стандартной схемы, что соответствует выражению (12). Особенно это заметно в ближней зоне. В то же время амплитудные шумы альтернативной схемы, как и ожидалось из (11), выше амплитудных шумов стандартной схемы. Таким образом, фазовый сдвиг импульса тока транзистора относительно тока резонатора приводит к перераспределению СПМ шума

между фазовым и амплитудным шумом. Амплитудный шум в дальнейшем может быть подавлен схемами ограничения.

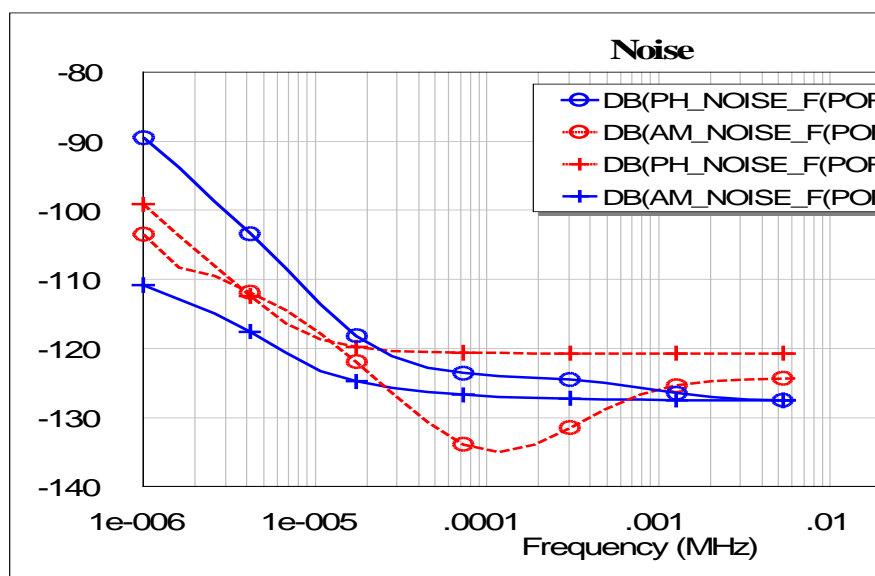


Рис. 8. СПМ фазового (сплошная линия) и амплитудного (пунктир) шума стандартной (кружочки) и альтернативной (крестики) схем Колпица

VI. ВЫВОДЫ

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

В схемах, в которых активный элемент большую часть времени находится в состоянии отсечки (разрыв цепи) или в состоянии короткого замыкания, основной шум создается в момент переключения состояния (активная фаза работы усилительного элемента), и чем короче этот интервал времени, тем меньше вносимые шумы.

Генераторы, в которых реализуется квазилинейный режим работы с мягким ограничением сигнала, должны уступать по шумовым свойствам генераторам с жестким ограничением, в которых активные элементы работают в импульсном режиме;

Возможна разработка сложной схемы возбуждения на основе КМОП – инверторов, обладающей малым уровнем фазовых шумов и способностью возбуждать резонаторы с большим сопротивлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shock-excited oscillator пат. 2817019А, США, заявитель и патентообладатель R.Creveling, заявл 01.12.1955; опубл. 17.12.1957.
2. Малошумящий термокомпенсированный кварцевый генератор ударного возбуждения: пат. 2420859С2, Рос. Федерация: МПК H03B5/32/ Ю.С. Иванченко; заявитель и патентообладатель Ю.С. Иванченко, заявл 02.09.2009; опубл. 10.06.2011, Бюл.№16.8с.

УДК 681.787.7

ГИДРОСТРУЙНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ

Е. В. Леун

ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Москва, Россия

Аннотация – В статье представлен разработанный гидроструйный способ контроля размеров изделий для задач станко-, машино- и приборостроения на этапах межоперационного и послеоперационного контроля, а также автоматического контроля на различных операциях металлообработки на металлообрабатывающих станках. Способ основан на использовании струи жидкости, например, на основе смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в режиме ламинарного течения, направленной на контролируемое изделие.

лие в качестве жидкого световода с одномодовым режимом передачи света и образованием оптического измерительного канала лазерного интерферометра перемещений. Поверхность изделия является отражателем для оптического излучения, распространяющегося вдоль струи к изделию и обратно.

На примерах использования в качестве жидкости глицерина и дистиллированной воды (в дальнейшем – вода) для разных диаметров струи рассчитаны соотношения между следующими значениями оптических и гидродинамических параметров: одномодовый режим передачи света по жидкостной струе со значением нормализованной частоты $V_{од}=2,4$, ламинарный режим движения жидкости со значением числа Рейнольдса $R_e=2300$, максимальная сила давления на поверхность изделия $F_n=3$ Н. Определены значения диапазона измерений, зависящего от длины цельной, нераспавшейся на капли части струи.

Показана возможность измерения размеров изделий с резьбой, а также совмещения с технологическими операциями гидрообработки поверхности изделия: гидроочистки и гидроабразивной очистки, а также гидрошлифования и гидрополирования. Обсуждаются вопросы управления пространственным положением струи жидкостей.

Ключевые слова: струя жидкости, жидкий световод, магнитная жидкость, гидроструйный интерферометр.

I. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно приборы активного контроля (ПАК) размеров изделий на металлообрабатывающих станках основаны на использовании механического контакта измерительного наконечника с поверхностью изделия [1]. Эти приборы успешно зарекомендовали себя в течение длительного времени применения, однако имеют ограничения по точности измерений и быстродействию и не позволяют устранить (или учесть) высокочастотные биения и колебания изделия при его обработке. В течение уже многих лет разные исследователи предпринимают попытки по созданию бесконтактных ПАК и, в первую очередь, оптических, обладающих потенциально более высокими характеристиками по точности и быстродействию. Однако одной из проблем для создания таких ПАК является сложная окружающая среда для прохождения оптического излучения, состоящая из потока смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), направленной к месту обработки. Это не позволяет использовать высокоточные лазерные интерферометры для контроля размеров изделий. В 2012 году был достигнут частичный прогресс в этом направлении и разработан способ активного контроля линейных размеров с использованием лазерного интерферометра и оптически прозрачного и высокопрочного наконечника [2]. Однако в нем не удалось полностью отказаться от механического контакта с поверхностью изделия.

Для решения этой проблемы был разработан гидроструйный способ контроля размеров изделий с применением лазерного интерферометра перемещений, в котором используется струя жидкости, формирующая световодный канал для направленной одномодовой передачи света до изделия и обратно. Эта струя является фактически одновременно и измерительным стержнем, и измерительным наконечником, образуя гидравлический контакт с поверхностью изделия. Однако для понимания реальных возможностей не определены физико-технические параметры предложенного способа.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачи исследований заключаются в определении физико-технических параметров, определяющих условия работоспособности и реализации основных технических характеристик гидроструйного интерферометрического способа контроля размеров изделий.

III. ТЕОРИЯ

Разработанный гидроструйный способ контроля реализованный с помощью гидроструйного интерферометра, представленного на рис.1, включает камеру 1 с жидкостью, вытекающей струей диаметром $D_{стр}$ через сопло 2, с давлением P_0 создаваемым насосом 3, измеритель 4, ВОП 5 на основе одномодового волокна, отклоняющую систему 6.

В качестве измерителя 4 используется высококогерентный лазерный интерферометр перемещений с выходным сигналом $U_1(L_y)$.

Поверхность изделия 7 является отражателем для оптического излучения 8 измерителя 4, а измерения смещений L_y отражателя от точки отсчета в заданной системе координат позволяет определить отклонения его геометрических размеров. Распространение света 8 по ВОП 5 и струе 9 до поверхности изделия 7 и обратно формирует измерительный канал измерителя 4.

Сопло 2 используется для формирования вытекающей струи 9 диаметром $D_{стр}$ из камеры 1 ламинарным потоком для передачи света 8 в одномодовом режиме.

ВОП 5 является одномодовым световодом, первый конец которого оптически соединен с измерителем 4, а второй введен в камеру 1, расположен в сопле 2 (может быть снабжен линзой/ами) для ввода/вывода оптического излучения 8, распространяющегося по струе 9, до поверхности изделия 7 и обратно.

Отклоняющая система 6 используется для отклонения струи 16 по сигналу $U_2(t)$ и изменения координаты гидравлического контакта струи жидкости с изделием 7.

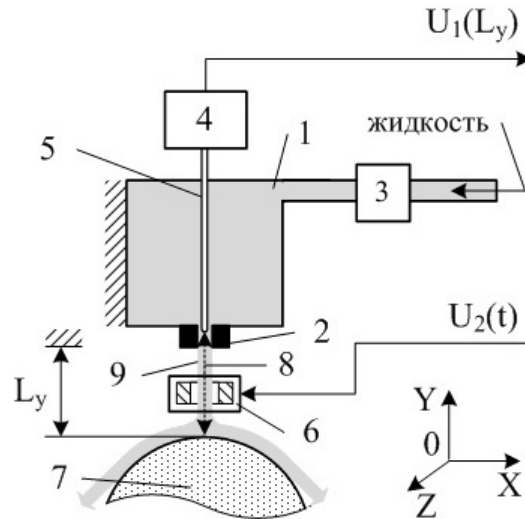


Рис.1. Схема гидроструйного интерферометра для контроля размеров изделий

В камере 1 создают насосом 3 давление P_0 жидкости, заставляя вытекать её струей 9 из сопла 2 ламинарным потоком длиной $L_{стр}$ и диаметром $D_{стр}$ к изделию 7, стекая по нему. Измерителем 4 с помощью ВОП 5 освещают оптическим излучением 8 эту струю 9, осуществляющую его двунаправленную передачу к поверхности изделия 7 и обратно. Отраженное от изделия 7 излучение 8 следует обратно, через струю 9, ВОП 5 и возвращается к измерителю 4 для измерения.

Путь оптического излучения: ВОП 5 → струя 9 → изделие 7 → струя 9 → ВОП 5 является переменной частью оптического измерительного канала измерителя 4, связан с текущей координатой L_y поверхности изделия 7 и, соответственно, с отклонением его размера от заранее заданного в выбранной системе координат. Значение L_y определяется измерителем 4 и выдается электрическим сигналом $U_1(L_y)$ в виде цифрового кода $N(L_y)$ как результат измерений (с учетом двойного хода оптического излучения 9): $N(L_y) \sim 2 \cdot k \cdot L_y / \lambda$, где λ – длина волны света, k – коэффициент пропорциональности.

Реализация предложенного способа основана на соотношениях оптических, гидродинамических, метрологических и других параметров, анализ которых и расчет значений представлен далее при использовании в качестве жидкости глицерина и воды. Для расчетов приняты допущения о том, что выбранные жидкости несжимаемы, а формируемые ими струи являются цилиндрическими с постоянным диаметром по всей длине. Результаты расчетов основные физико-технические параметры предложенного способа контроля приведены далее в табл. 1.

1. Анализ оптических и гидродинамических параметров.

Итак, в рассматриваемом гидроструйном способе контроля размеров изделий световодом является жидкая струя диаметром $D_{стр}$, а оболочкой – воздух и должны выполняться следующие условия:

- одномодовый режим передачи света по жидкостной струе со значением нормализованной частоты - $V_{од} = 2,4$;
- ламинарный режим движения жидкости со значением числа Рейнольдса - $R_e = 2300$;
- максимальная сила давления на поверхность изделия F_H не должна превышать 3 Н, подобно усилию, возникающему в процессе выхода наконечника из впадины на выступ при контактном контроле размеров изделий с прерывистой поверхностью.

Эти условия можно объединить в единую систему уравнений:

$$\begin{cases} V_{од} = 2,4 \\ R_e = 2300, \\ F_H = 3 \end{cases} \quad (1)$$

С помощью первого уравнения системы уравнений (1) определяются оптические параметры струи, в частности, соотношение между длиной волны отсечки λ_c и диаметром сердцевины световода, т.е. диаметром струи $D_{стр}$:

$$\lambda_c = \pi \cdot D_{стр} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / V_{од}, \quad (2)$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления жидкости струи и оболочки.

С учетом того, что для одномодового режима передачи света $V_{од} = 2,4$ и в качестве оболочки для струи выступают воздух с $n_2 = 1$, то выражения (2) можно изменить к следующему виду:

$$D_{стр} = \frac{2,4 \cdot \lambda_c}{\pi \sqrt{n_1^2 - 1}} \quad (3)$$

Ламинарный режим движения жидкости, связанный с числом Рейнольдса, определяется с помощью выражения

$$R_e = v_{стр} \cdot D_{стр} / \nu, \quad (4)$$

где $v_{стр}$ – скорость движения жидкости в струе, ν – вязкость жидкости.

На основе уравнения Бернулли, пренебрегая потерями энергии при вытекании жидкости из камеры 1 через сопло 2 и действием силы земного притяжения из-за малой длины струи скорость жидкости запишется как

$$v_{стр} = \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}}, \quad (5)$$

где P_0 – избыточное давление в камере 1, ρ – плотность жидкости.

Таким образом, итоговое выражение, полученное из первых двух выражений системы уравнений (1), при ламинарном режиме течения струи жидкости с максимальным значением $R_e = 2300$ записывается в следующем виде:

$$\lambda_c = 3010,7 \nu \sqrt{\frac{\rho(n_1^2 - 1)}{2P_0}}. \quad (6)$$

С учетом третьего уравнения в системе уравнений (1) важно рассчитать силу давления струи на поверхность изделия F_n , определяемую по формуле:

$$F_n = \frac{\pi \rho D_{стр}^2 v_{стр}^2}{4}. \quad (7)$$

Для максимально допустимого значения $F_n = 3$ выражение (7) преобразуется к формуле, связывающей скорость и диаметр струи с плотностью жидкости

$$v_{стр} = \frac{1,95}{D_{стр} \sqrt{\rho}} \quad (8)$$

Итак, с учетом всех приведенных преобразований из системы уравнений (1) формируется новая система уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_c = 3010,7 \nu \sqrt{\frac{\rho(n_1^2 - 1)}{2P_0}} \\ v_{стр} = \frac{1,95}{D_{стр} \sqrt{\rho}} \end{array} \right., \quad (9)$$

Система уравнений (9) определяет граничные условия при реализации рассматриваемого струйного способа контроля для одномодового режима передачи света, ламинарного режима течения жидкости в струе с максимальным значением числа Рейнольдса и максимальной силой давления на поверхность изделия:

2. Анализ источников лазерного излучения.

В соответствии с полученными выражениями проведен расчет основных физико-технических параметров при использовании в качестве жидкости струи глицерина или воды, результаты которого приведены в табл.1. Диаметры отверстий и струи $D_{стр}$ выбраны следующими: 9 (как в струйной печатающей головке CanonFine [3]), 30 (как в сопле для резки материалов [4]), 100, 200, 500 и 1000 мкм. Согласно формуле (3), эти значения диаметров струи $D_{стр}$ связаны с длиной волны света λ_c , формируемой лазерами.

Массово применяемые лазеры, как правило, имеют длину волны в видимом или ближнем ИК-диапазоне 0,5...10 мкм. Однако к настоящему времени уже разработаны и используются лазеры для дальнего ИК-диапазона с длиной волны $\lambda \approx 1000...2000$ мкм [5] и реализация с их помощью гидроструйного интерферометра

не вызывает сомнений. Оптическое излучение видимого диапазона может быть вторым, дополнительным и применяться для удобства работы оператора при измерительных операциях.

3. Анализ метрологических параметров.

Представляется, что максимальный диапазон измерений $L_{\text{диап}}$ гидроструйного интерферометра определяется длиной когерентности лазера $L_{\text{ког}}$, которая для современных высококогерентных лазеров достигает значений не менее 1...10 м, и максимальной длиной цельной, компактной части струи $L_{\text{стр}}$ до распадаения её на отдельные капли, приводящей к нарушению одномодового режима передачи света. Значение $L_{\text{стр}}$ можно определить расчетным путем согласно [6, 7], при выполнении условия $\sqrt{\gamma D_{\text{стр}}/2\rho v^2} \leq 1$, характерного для данного случая с малыми отверстиями для глицерина или воды, определяется по формуле:

$$L_{\text{стр}} = 8,46 v_{\text{стр}} \sqrt{\rho D_{\text{стр}}^3 / 8\gamma} \quad (10)$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Результаты расчетов, представленные в табл. 1, показывают, что $L_{\text{стр}} \ll L_{\text{ког}}$ и значение $L_{\text{стр}}$ можно использовать для определения $L_{\text{диап}}$.

Для оценки погрешности измерений взяты хорошо изученные гетеродинные акустооптические интерферометры перемещений. Как упомянуто в [8], в работах Игнатова С.А. по исследованию лазерного интерферометра с акустооптоэлектронной обратной связью экспериментально достигнута разрешающая способность на уровне $\approx \lambda/1000$. Также ранее авторской работой было показано, что при построении подобных интерферометров с фазоцифровым преобразованием на основе системы ФАПЧ разрешающая способность ограничивается погрешностью от помех и шумов $\delta_{\text{ш}}$ формируемыми фотоприемником в процессе оптического гетеродинирования и погрешностью квантования $\delta_{\text{кв}}$. И при их равенстве достигаются значения $\delta_{\text{ш}} = \delta_{\text{кв}} = \lambda/3000$, создавая существенный резерв повышения точности измерений [8].

Однако наибольший вклад в суммарную погрешность измерений Δl вносит погрешность, определяемая условиями окружающей среды, особенно температурная погрешность δ_t . В итоге суммарную погрешность измерений Δl для реальных производственных условий обычно оценивают не выше чем $\lambda/500$.

На характер отражения света существенно влияет шероховатость поверхности изделия R_a и обычно пользуются соотношением, связывающее её и длину волны света λ :

$$\lambda \geq R_a/6, \quad (11)$$

при выполнении которого диффузным рассеянием можно пренебречь и считать отражающую поверхность зеркальной. Расчет допустимых значений шероховатости поверхности R_a с учетом этого условия приведен в табл. 1.

4. Анализ динамических параметров.

Оценка динамических параметров может быть важна при автоматическом контроле изделий, в первую очередь, на круглошлифовальном станке, когда изделие может описывать сложную вращающуюся траекторию движения с появлением высокочастотных биений (вибраций, колебаний) и соответствующими радиальными смещениями. Во избежание возникновения динамической погрешности измерений, вплоть до полного срыва непрерывного процесса измерений, скорость таких смещений $v_{\text{рад}}$ не должна превышать скорость движения жидкости в струе $v_{\text{стр}}$ и максимальную скорость движения изделий, контролируемым лазерным интерферометром $v_{\text{инт}}$.

В расчетах для табл.1 значение $v_{\text{стр}}$ соответствует 39,84 м/с для глицерина и 44,72 м/с для воды. И значение $v_{\text{инт}}$ в современных акустооптических лазерных интерферометрах достигает значений не менее чем 0,2...0,5 м/с.

Скорость радиальных смещений рассчитывается исходя из того, что в обрабатываемом изделии, вращающемся с частотой 600 об/мин, соответствующей частоте 10 Гц, могут формироваться радиальные биения с амплитудой до ≈ 3 мкм с частотой вплоть до 10 гармоники, т.е. 100 Гц. Тогда максимальная радиальная скорость перемещения на этой гармонике изделия достигнет значений $0,3 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Таким образом, видно, что $v_{\text{стр}} \gg v_{\text{инт}} \gg v_{\text{рад}}$ и максимальная радиальная скорость является весьма малой величиной, и это свидетельствует о том, что данное техническое решение обладает достаточным быстродействием для измерения размеров изделий и при реализации двухконтактного способа контроля эти высокочастотные биения могут быть полностью измерены и скомпенсированы.

5. Анализ функциональных возможностей.

Выполнение условия (11), в котором неоднородность поверхности является регулярной, как, например, для резьбы, позволяет реализовать возможность контроля размеров резьбовых изделий.

Использование струи жидкости, направленной на изделие, позволяет осуществлять гидроочистку поверхности изделия от нагара, окалины, следов окисных пленок и других эксплуатационных загрязнений. После добавления в жидкость абразива (корунд, электрокорунд, гранатовый песок) можно реализовать и гидрообработку в

виде гидрошлифования или гидрополирования с получением шероховатости поверхности нужного значения и наклепанной, благодаря чему изделие становится более надежным и долговечным в эксплуатации.

Представляется, что, как и в случае отражения света от шероховатой поверхности неравенства (11), во избежание нарушения когерентности света, следующему по жидкой струе с абразивными частицами размером $d_{абр}$ должно выполняться подобное неравенство

$$d_{абр} \leq \lambda/6 \quad (12)$$

и для набора параметров по п. 1.5 изтабл. 1 получается $d_{абр} \leq 80$ мкм.

Кроме того, использование струи в качестве измерительного наконечника дает возможность, в случае необходимости, осуществлять управляемое её смещение перпендикулярно её оси с соответствующим сдвигом координаты образующегося гидравлического контакта. Потребность в этом может возникать для разных измерительных задач при контроле изделий с разными геометрическими размерами. Реализация подобного возможна при воздействии на заряженную струю электрическим полем, и подобный эффект широко используется в струйных печатающих головках [3].

Другим способом смещения струи является использование магнитных жидкостей с воздействием электрическими и магнитными полями [9]. В связи с тем, что размер магнитных частиц, как правило, не превышает 10 нм, то условие (12) выполняется без труда.

В табл. 1 приведены результаты расчетов основных физико-технических параметров предложенного способа контроля при использовании в качестве жидкости глицерина и воды при давлении 1,0 МПа.

ТАБЛИЦА 1
ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ЖИДКОСТИ ГЛИЦЕРИНА ИЛИ ВОДЫ
ПРИ ДАВЛЕНИИ 1,0 МПА

Жидкость	№	Диаметр струи $D_{стр}$, мкм	Длина волны отсечки λ_c , мкм	Число Рейнольдса Re	Давление струи на поверхность изделия $F_{п}$, Н	Диапазо- низмерения $L_{стр}$, мм	Погрешность измерений Δ , мкм	Шероховатость поверхности Ra , мкм
Глицерин ($n=1,47$, $\rho=1260$ кг/м ³ , $\nu=176 \times 10^{-6}$ м ² /с)	1.1	9	12,7	2,04	0,13	0,45	0,025	2,12
	1.2	30	42,3	6,79	1,41	2,71	0,085	7,05
	1.3	100	141	22,64	15,71	16,50	0,282	23,50
	1.4	200	282	45,27	62,83	46,68	0,564	47,00
	1.5	354,6	500	80,27	197,50	110,19	1,000	83,33
	1.6	500	705	113,18	392,68	184,50	1,410	117,50
	1.7	1000	1410	226,36	1570,72	521,85	2,820	235,00
Вода ($n=1,33$, $\rho=1000$ кг/м ³ , $\nu=1,0 \times 10^{-6}$ м ² /с)	2.1	9	10,3	402,48	0,13	0,424	0,021	1,72
	2.2	30	34,35	1341,6	1,41	2,578	0,069	5,74
	2.3	51,44	59,05	2300	4,16	5,788	0,118	9,84
	2.4	100	114,5	4472	15,71	15,688	0,230	19,13
	2.5	200	229,6	8944	62,83	44,372	0,459	38,27
	2.6	500	574	15858	197,50	104,754	0,814	67,85
	2.7	1000	1148	22360	392,68	175,394	1,148	95,67

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

К настоящему времени интерферометрические способы и устройства контроля активно работают с жидкими средами [10], часто применяются в медицине, например, при анализе спектров, кровью и др. [11], поэтому создание подобных высокоточных интерферометрических систем измерений уже давно подтверждено.

Проведенные ранее экспериментальные исследования подтвердили возможность управления смещением струи магнитной жидкости [9]. Однородное магнитное поле формировалось с помощью катушек Гельмгольца, позволяющих получать горизонтально направленное однородное магнитное поле напряженностью до 110 Э. В пространство между катушками вводилась струя магнитной жидкости с возможностью регулировки скорости её истечения так, что ось струи перпендикулярна вектору напряжённости магнитного поля. Диаметр струи составлял 2 мм, а магнитная восприимчивость магнитной жидкости – 9,5. Поведение струи фиксировалось с помощью скоростной видеокамеры при частоте съёмки 300 кадров в секунду. На рис. 2 представлен снимок струи в магнитном поле напряжённостью 60 Э, 70, 80 и 90 Э.

В ходе проведения экспериментов было установлено, что под действием магнитного поля вдоль поверхности струи развивается неустойчивость, приводящая к трансформации формы струи и появлению линейного участка струи и нелинейного с изменением формы от цилиндрической к синусоидальной и/или «хлыстообразной», в т.ч. с её распадом до капель. При этом распад струи на капли происходит тем раньше, чем больше напряжённость магнитного поля и меньше скорость течения струи.

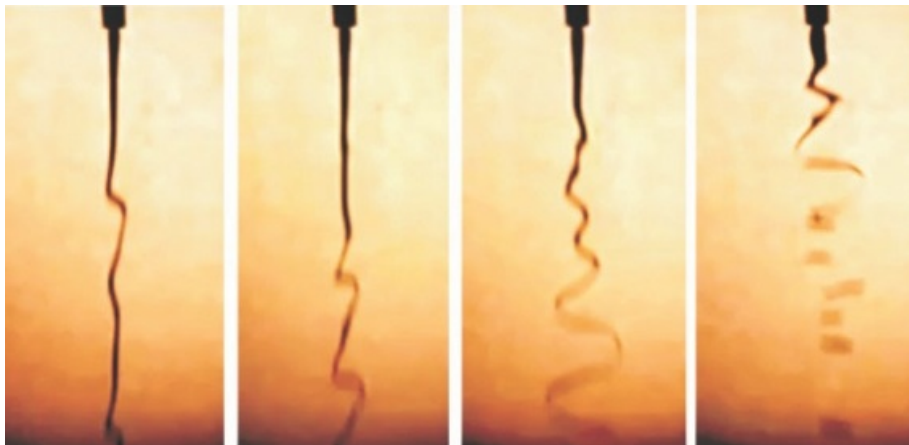


Рис. 2. Фотографии с демонстрацией смещения струи вплоть до синусоидальных и даже «хлыстообразных» движений под действием магнитного поля [9]

На рис. 3а, б графически представлены экспериментально полученные зависимости максимального отклонения $\Delta l_{стр}$ и длины линейного участка струи $L'_{стр}$ от напряжённости магнитного поля при разных значениях скорости течения струи [9]. Как следует из рисунков, с ростом скорости течения величина максимального отклонения струи от вертикали и длина линейного участка струи возрастают.

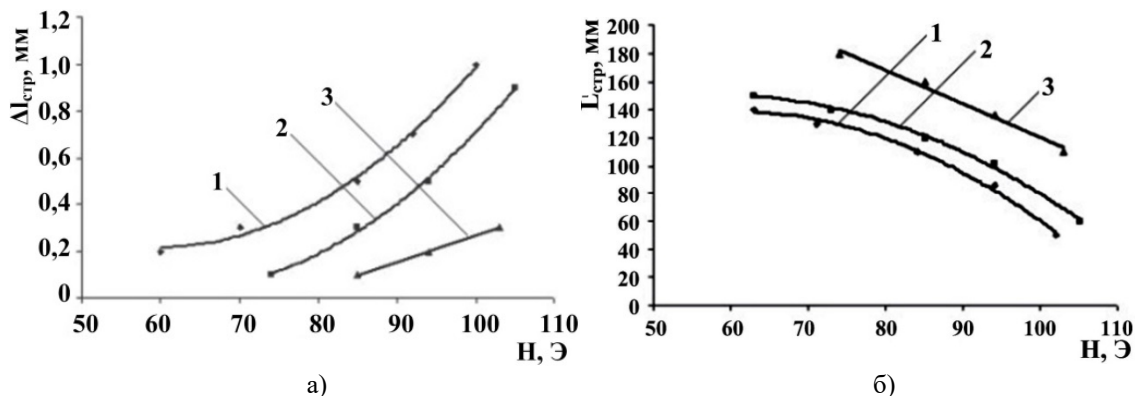


Рис. 3. Зависимости параметров струи магнитной жидкости от напряженности магнитного поля:
 а) зависимость максимального отклонения (смещения) струи $\Delta l_{стр}$ от напряженности магнитного поля H при разной скорости течения струи: кривая 1 – 2,4 мм/с; кривая 2 – 4 мм/с, кривая 3 – 6 мм/с;
 б) зависимость длины линейного участка струи $L'_{стр}$ от напряженности магнитного поля H при разной скорости течения струи: кривая 1 – 2,4 мм/с; кривая 2 – 4 мм/с, кривая 3 – 6 мм/с.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные результаты исследований предложенного гидроструйного интерферометрического способа контроля размеров изделий на примере глицерина подтверждают его хорошие физико-технические параметры, практическую реализуемость и широкие функциональные возможности. Так, для диаметров струй $D_{стр} \geq 300$ мкм с длиной волны лазера в дальней ИК-области $\lambda \geq 500$ мкм, формируемой длиной цельной компактной части струи (до распада на капли) в режиме ламинарного потока и соответствующим диапазоном измерения $L_{стр} \geq 100$ мм погрешность измерения составит 1 мкм.

Полученные результаты исследований при использовании воды значительно уступают приведенным выше результатам. Это обусловлено в основном тем, что переход от ламинарного режима течения к турбулентному со значением числа Рейнольдса $R_e=2300$ происходит уже при диаметре струи $D_{стр}$ около 50 мкм и при диапазоне измерений $L_{стр}$ всего лишь при $\approx 5,7$ мм. Уменьшение давления позволит немного увеличить диаметр струи, но уменьшит диапазон измерений. Поэтому вода или СОЖ на водной основе малоперспективны для применения в подобном способе.

Тем не менее, имеется общий резерв совершенствования рассматриваемого способа в направлении уменьшения длин волн лазера и увеличения диаметров струй $D_{стр}$. В качестве одного такого варианта может быть использование следующего сочетания: лазерный интерферометр повышенным шумоподавлением + одномодовый режим передачи света световодом + маломодовый режим передачи света жидкостной струей.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С точки зрения практической реализации и широкого использования, представленный способ предпочтителен с использованием жидкостей по физическим параметрам, близкими к глицерину, для диаметров струй ≥ 300 мкм с длиной волны лазера ≥ 500 мкм, формируемой длиной цельной компактной части струи в режиме ламинарного потока и соответствующим диапазоном измерения ≥ 100 мм, при сочетании которых погрешность измерения составит 1 мкм.

Быстродействие рассмотренного способа достаточно высокое для применения двухконтактных приборов активного контроля размеров изделий с компенсацией возможных высокочастотных колебаний изделия от биений, возникающих в процессе обработки.

Функциональные возможности способа позволяют применять его для контроля размеров изделий с регулярными неоднородностями поверхности в виде резьб и реализовать гидроочистку поверхности изделия от нагара, окалины, следов окисных пленок и других эксплуатационных загрязнений, а после добавления в жидкость абразива (корунд, электрокорунд, гранатовый песок) размерами частиц $d_{абр} \leq 80$ мкм можно реализовать и гидрообработку в виде гидрошлифования или гидрополирования. Также возможно управление смещением струи жидкости за счет использования электрического и магнитного полей.

По совокупности всех приведенных физико-технических параметров можно считать рассматриваемый гидроструйный интерферометрический способ контроля размеров изделий перспективным для использования в приборо-, машино- и станкостроении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леун В. И., Тигнибидин А. В. Новые принципы построения приборов активного контроля для изделий инструментальных производств и машиностроения // Омский научный вестник. 2010. № 2 (90). С. 165–169.
2. Пат. 2557381 РФ, МПК В 24 В 49/00, G 01 В 7/12. Способ активного контроля линейных размеров в процессе обработки изделия и устройство для его реализации. Леун Е. В., Леун А. В. № 2013152692 ; заявл. 28.11.13 ; опубл. 20.07.15, Бюл. № 20.
3. Бёртон Дж. Струйные печатающие головки: основы технологий. URL: http://www.publish.ru/articles/201306_20013073 (дата обращения: 12.05.2016).
4. Пат. 2171718 РФ, МПК В05 В 1/02. Способ герметизации соплового насадка. Тихонов В. И., Казимов М. В., Манойленко Э. В., Калашников В. Г. № 99124049, заявл. 15.11.99; опубл. 10.08.01.
5. Веденов А. А., Мыльников Г. Д., Соболенко Д. Н. Генерация когерентного излучения дальнего инфракрасного диапазона, основанная на применении лазеров // УФН. 1982. 138. С. 477–515. URL: <http://ufn.ru/ru/articles/1982/11/d/> (дата обращения: 12.05.2016).
6. Basset A. B. // Amer.J.Math. 1894.Vol.16. P.93–110.
7. Weber C. // Z.Angew. Math.Mech. 1931. Bd.11. H.3. P.136–154.
8. Леун Е. В. Особенности схмотехники акустооптических лазерных систем для измерения перемещений с фазоцифровым преобразованием // Технология машиностроения. 2002. № 5. С. 33–39.

9. Диканский Ю. И., Борисенко О. В., Закинян А. Р. Неустойчивость струи магнитной жидкости в перпендикулярном магнитном поле // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 1. С.375–378.

10. Пат. 2353925 РФ, МПК G01 N 29/04, G01 B 9/00, G01 B 17/00. Устройство для бесконтактного высокоточного измерения физико-технических параметров объекта. Бржозовский В. М., Грачев Д. В., Елисеев Ю. Ю., Захарченко М.Ю., Захарченко М. Ю. №2007135888/28; заявл. 27.09.07; опубл. 27.04.09, Бюл. № 12.

11. Лычагов В. В., Кальянов А. Л., Рябухо В. П. Низкокогерентная полнополюсная интерферометрия объемной структуры кристаллизовавшейся капли солевого раствора белка // *Компьютерная оптика*. 2010. Т. 34, № 1. С. 90–100.

УДК 621.317.799

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ БИС

А. В. Никонов, Г. В. Никонова

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Рассмотрена функциональная и элементная база, используемая при разработке контрольно-измерительной аппаратуры для испытания больших интегральных схем. Показаны методы, позволяющие достигнуть разрешающей способности менее 100 пс при погрешности не более 10–20 пс. Проведён анализ методов временной задержки, которые можно использовать при создании цифровых устройств пикосекундного диапазона для ультравысокочастотных сигналов. Приведена структура высокоточной цифровой линии задержки для УВЧ диапазона, работающей в интервале до 15 нс и имеющей погрешность не более 20 пс.

Ключевые слова: УВЧ диапазон, испытательная система, линия задержки, фазовая синхронизация.

1. ВВЕДЕНИЕ

Опираясь на основные направления совершенствования контрольно-измерительной аппаратуры для испытаний БИС [1], рассмотрим современную функциональную и элементную базу для практической разработки испытательных систем.

В автоматизированных системах УВЧ диапазона, производящих установку и временных параметров в субнаносекундной области, важную роль играют управляемые цифровые линии задержки, определяющие разрешающую способность и точность временных параметров. Но методы, используемые при их построении, не позволяют достигнуть разрешающей способности менее 100 пс при погрешности не более 10–20 пс. Отечественные разработки характеризуются разрешающей способностью программируемой задержки порядка 400 пс. Цифровая интегральная схема (ИС) для гибридных активных линий задержки КБ156БР1А-4 имеет шаг 5 нс в диапазоне до 25 нс при входной частоте до 20 МГц. Генератор кодовых комбинаций «Геккон» имеет погрешность установки временных параметров 15 %. Зарубежные изделия характеризуются задержкой сигнала в диапазоне 5–200 нс при погрешности 2 нс.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Научно-техническую и практическую суть данного исследования представляет формирование концепции построения цифровых устройств задержки пикосекундного диапазона для ультравысокочастотных сигналов, работающих с пикосекундным разрешением. Направлением, на котором достигнуты хорошие результаты в создании структурной, технологической и элементной базы для автоматизированных измерительных систем ультравысокочастотного диапазона до частот 1-3 ГГц, являются арсенид-галлиевая и Q-ED технологии [2]. Например, генератор тест-последовательности PG-1400 (ф. Outlook Technology Inc.) при частотах до 1360 МГц имеет диапазон временных параметров до 2 нс при разрешающей способности 100 пс. Система аттестации формирующего устройства установки «ETS 7000» (ф. Hilevel Technologies) для кодов RZ, NRZ, NRZ с задержкой, RO имеет погрешностью до 500 пс. В установке «Polaris-100» (комп. Megatest Corp.) в формирователе стробимпульсов достигнута погрешность задания временного положения 150 пс.

Зарубежные разработчики предлагают создавать переменные задержки с помощью готовых типовых функциональных элементов в виде полузаказных БИС [3]. Программируемые задержки должны исключить или скомпенсировать разброс временных параметров других системных компонентов в каналах испытательных

систем. Также отмечается, что регулирование задержки возможно при помощи аналоговой обратной связи. Но при этом не уделяется внимание тому, как получен сигнал рассогласования.

Современная подсистема коррекции задержек должна охватывать все скоростные каналы и работать в необходимой полосе частот. При этом погрешность устранения временного рассогласования должна стремиться к значению не более 0,1 % от периода тактового сигнала. Коррекция должна выполняться автоматически.

Кроме того, необходимо ставить задачу метрологической аттестации полученного временного сдвига. Метрологическая аппаратура должна сопровождать испытательные системы в течение всего жизненного цикла.

III. ТЕОРИЯ

Проведём анализ методов задержки, которые можно использовать в создании цифровых устройств задержки пикосекундного диапазона для ультравысокочастотных сигналов. В работе не рассматриваются методы, где задержка происходит с помощью преобразования электрического сигнала в механические колебания. Такие устройства пригодны для формирования относительно больших интервалов времени.

В качестве основного метода используют селекцию на основе фильтра нижних частот (ФНЧ). Частота среза ω_{SR} фильтра определяется значениями применяемых индуктивностей L и ёмкостей C . Для частот $\omega \ll \omega_{SR}$, групповое время пробега постоянно и приблизительно равно $(LC)^{1/2}$. В области частот, близких к значению ω_{SR} , время пробега резко изменяется, и поэтому выходной импульсный сигнал искажается. Увеличение частоты ω_{SR} уменьшает искажения, одновременно уменьшая время пробега одного звена. При заданных значениях ω_{SR} и времени задержки t_{ZD} необходимое количество звеньев n в ФНЧ определяется: $n = t_{ZD} \omega_{SR} / 2$.

В пределе увеличение числа звеньев ведет к линии, для которой $\omega_{SR} \rightarrow \infty$. Такие линии могут быть изготовлены с минимальным временем задержки в сотни наносекунд. Время пробега равно $(l/c)(\epsilon_R \mu_R)$. Здесь l – длина линии; $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с; ϵ_R – относительная диэлектрическая проницаемость; μ_R – относительная магнитная проницаемость.

Искусственные линии задержки (ЛЗ), состоящие из элементов с сосредоточенными параметрами (цепочечные), могут дополнительно иметь индуктивную связь (коэффициент связи 12 %). Для них количество звеньев n определяется: $n = 4(t_{ZD}/t_N)$, где t_N – время нарастания импульса на выходе цепи. Время задержки одного звена и частота среза связаны выражениями: $t_{ZDN} = t_{ZD}/n$; $f_{SR} = 0,404/t_{ZDN}$.

Таким образом, реализация минимального времени задержки, широкого диапазона частоты следования сигналов и высокой точности установки задержки в таких линиях невозможны.

В [4] рассмотрены характеристики различных линий с переменным временем задержки. Рассмотрим использование варикапов и ферритов с подмагничиванием в ЛЗ. Известно, что индуктивность катушки L с ферромагнитным сердечником определяется выражением:

$$L = N \frac{d\Phi}{di},$$

где N – число витков; Φ – магнитный поток; i – сила тока. Или:

$$L = (kN^2 / S) \mu_r,$$

где k – коэффициент пропорциональности; S – площадь сечения.

Следовательно, индуктивность катушки является функцией крутизны зависимости индукции от напряженности поля. Вводя постоянную составляющую магнитного поля, воздействующего на сердечник при помощи подмагничивания постоянным током, можно менять наклон кривой намагничивания для переменного тока. Зависимость относительной проницаемости феррита от тока аппроксимируется экспоненциальной зависимостью: $\mu_R = \mu_N \exp(-\alpha i)$, где μ_N – начальная магнитная проницаемость; α – коэффициент, зависящий от состава феррита.

Таким образом, индуктивность уменьшается при увеличении тока подмагничивания. Поэтому можно подобрать закон изменения индуктивности, необходимый для обеспечения задержки.

Недостатком этого метода является неоднозначность зависимости μ_R/μ_N от напряженности постоянного поля. Это объясняется гистерезисными явлениями. Кроме того, подмагничивание ферритов обладает большой зависимостью температурного коэффициента проницаемости от значения температурного коэффициента пропорции и от намагничивающего поля. Зависимость и по величине, и по знаку ведёт к сложности компенсации нестабильности индуктивности в диапазоне температур.

Также противоречивы требования к высокой крутизне кривой намагничивания, высокой начальной проницаемости и к минимальным потерям в диапазоне частот при обеспечении добротности.

Регулирование задержки прохождения сигнала в микрополосковой линии аналогично по принципу, но дополнительно обладает ограничением на применение в нижней части частотного диапазона.

Применение варикапов в ЛЗ позволяет уменьшить потребляемую мощность, массу, объём, увеличить стабильность по сравнению с ферритовыми. Для задержки используется зависимость барьерной ёмкости варикапа C_V от приложенного напряжения U : $C_V = \chi(U + \varphi_K)^{-\gamma}$, где χ – коэффициент, определяющий ёмкость варикапа при полном смещении (с учётом φ_K), равном 1 В; φ_K – контактная разность потенциалов; γ – показатель нелинейности варикапа.

Максимальный коэффициент перестройки определяется пробивным напряжением варикапа и минимальным напряжением смещения. При малых значениях растёт температурная нестабильность варикапов, падает их добротность, растут нелинейные искажения по переменному току.

Безиндуктивные ЛЗ используют активные RC-цепи, обладающие свойствами фильтров [4], и изготавливаются на основе генераторов, конверторов отрицательного сопротивления, операционных усилителей и т. п. Но проблема создания генератора-усилителя с высоким входным и выходным сопротивлением в широкой полосе частот не решена, так как проводимости усилителей действуют как паразитные сопротивления потерь, уменьшая добротность генератора. Рабочая частота таких ЛЗ ограничивается десятками мегагерц.

В [5] для задержки сигнала используется метод формирования задержки с помощью моностабильного устройства. Но этот метод характерен низкой точностью задания и стабильности задержки из-за несовершенства элементной базы. Формирование задержек в единицы и доли наносекунд невозможно.

Кодоуправляемые ЛЗ на основе зависимости задержки срабатывания элементов быстродействующих интегральных схем и элементов с накопленным зарядом от изменения порогового напряжения позволяют получить разрешающую способность в пикосекундном диапазоне, но стабильность, идентичность, временной шум устанавливаемого значения очень велики.

Рассмотрим фазовый метод, который является двухканальным и позволяет получить два сигнала, сдвинутых по фазе (по времени). Связь временных и фазовых соотношений определяется известным выражением: $\Delta\varphi = \omega\Delta t$, где $\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг между каналами; Δt – временной сдвиг между каналами.

Двухфазными генераторами называют устройства, служащие для воспроизведения двух когерентных сигналов. Они состоят из задающей части и фазосдвигающей части, в которой может быть использован фазовращатель, но он должен быть высокочастотным и работать в широкой полосе частот.

Фазозадающие устройства на основе многоустойчивых фазовых элементов имеют высокую точность установки. Минимальный дискрет фазового сдвига можно получить при одновременном запрещении одного импульса во входном сигнале делителей частоты каналов: $\Delta\varphi = (360/n)[1/(n+1)]$, где n и $(n+1)$ – коэффициенты деления делителей частоты каналов.

На основе фазового метода можно строить прецизионную ЛЗ с высокой разрешающей способностью следующим образом.

1. Создать канал, сигнал которого эквивалентен входному сигналу ЛЗ. В этом качестве может быть опорный канал фазозадающего устройства.

2. Создать второй канал, сигнал которого эквивалентен выходному сигналу ЛЗ. В этом качестве может быть сигнальный канал фазозадающего устройства.

3. Перенести фазовый сдвиг, заданный на относительно низкой частоте, в область УВЧ–СВЧ. Для этой цели используются фазовые автоподстройки частоты и фазы (АПЧ и АПФ) [6] в генераторах-калибраторах фазы и генераторах-калибраторах временных интервалов, характерных структурной и аппаратной избыточностью.

Поэтому можно предложить следующий способ.

1. Создать в области УВЧ–СВЧ сигнал, имеющий высококачественные спектральные характеристики для управления цифровым многоустойчивым узлом.

2. Сигнал по п. 1 должен иметь возможность управления по фазе.

3. Создать цифровой управляемый многоустойчивый узел на основе скоростной элементной базы, обеспечивающей необходимые частотные характеристики.

4. Обеспечить тактирование и регулирование по времени за счёт управления ключевым элементом путём установки необходимого фазового сдвига, что разрешит прохождение задерживаемого сигнала.

В качестве аналогов и прототипов можно применять методы получения задержек, изложенные в [7]. Но они не позволяют работать в области пикосекундных временных параметров и на частотах сотни – тысячи мегагерц.

Таким образом, в канале испытательной системы, рис. 1, на выходе синтезатора фазы 1 установлена электронная ЛЗ 2, управляемая кодом, необходимая для подстройки нулевого фазового сдвига между выходами в каналах испытательной системы. Далее сигнал поступает на синтезатор частоты 3, который формирует после-

довательность импульсов с частотой, меняющейся в пределах перестройки частоты синтезатора и с дискретом, определяемым частотой опорного сигнала синтезатора 3.

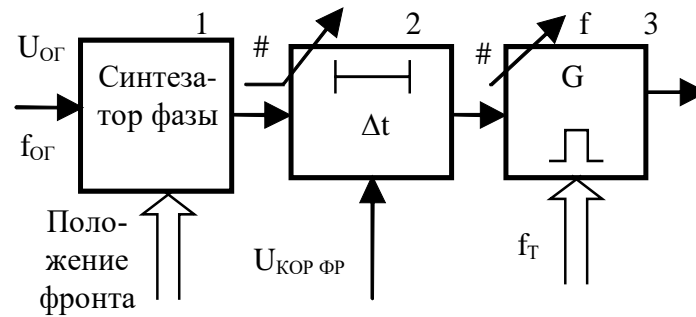


Рис. 1. Структура канала испытательной системы

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для высокоточной установки задержки в УВЧ диапазоне разработана цифровая синхронизируемая ЛЗ (ЦЛЗ), имеющая параметры: общая задержка 15 нс (возможно наращивание), погрешность установки задержки не более 20 пс. Данная цифровая ЛЗ, рис. 2, относится к «задержкам генераторов временных диаграмм», когда отсчёт задержки начинается по входному импульсу, а выходной фронт появляется спустя программируемый интервал времени. В ЦЛЗ возможно динамическое управление для задания независимого значения задержки для каждого запуска.

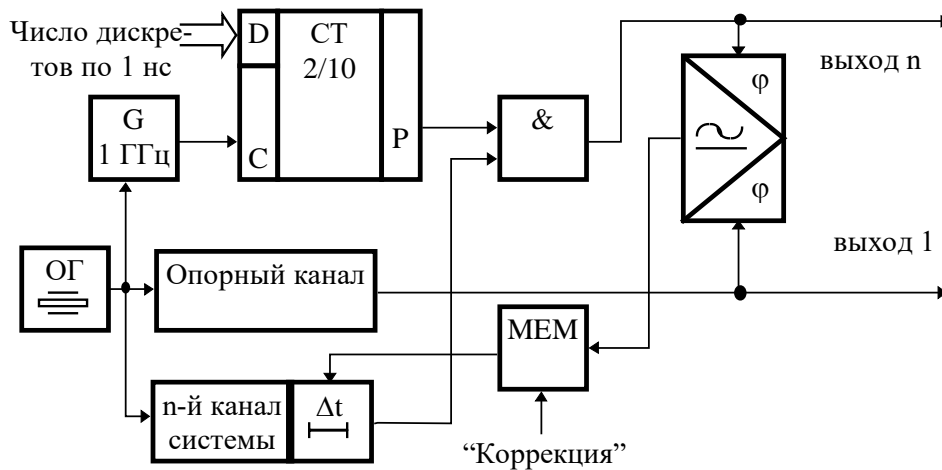


Рис. 2. ЦЛЗ в канале испытательной системы

В ЦЛЗ по задерживаемому сигналу синхронизируется тактовый генератор, работающий в УВЧ диапазоне 1–3 ГГц для получения спектрально чистого сигнала. Для этого используется фазовая автоподстройка частоты с фиксированным (или переменным) делителем частоты в цепи обратной связи. Код задержки записывается в счётчик с предустановкой, охваченный диодно-резистивной схемой «И». Вентиль, управляемый счётчиком, разрешает прохождение на выход задерживаемого сигнала через программируемый интервал времени. Такое построение ЦЛЗ является открытым для управления по фазе тактовым генератором и позволяет увеличить разрешающую способность задержки до 20–100 пс (мелкий дискрет) при возможности установки крупного дискрета 1–1000 нс.

Период тактирующего сигнала определяет разрешающую способность и формируется системой импульсно-фазовой автоподстройки частоты с делением. По выходному сигналу с частотой единицы мегагерц, прошедшему через регулирующий фазовращатель, управляется подстраиваемый генератор (ПГ) системы ФАПЧ, с которой снимается тактирующий сигнал. Значение частоты ПГ лежит в диапазоне 500–3000 МГц и определяется коэффициентом деления N ДПКД системы ФАПЧ. Этим задаётся крупный дискрет программируемой задержки 1–2 нс. Мелкий дискрет задаётся фазовым сдвигом, вносимым фазовращателем, и определяется выражением: $t_T = (T_T/360)N$, где T_T период тактового сигнала.

При экспериментальной проверке частота входного сигнала системы ИФАПЧ равнялась 128 МГц, частота сигнала на входе фазовращателя 2.56 МГц. Выходной сигнал имел частоту 1024 МГц, а минимальный вносимый фазовый сдвиг 0.1125° . При таких значениях крупный дискрет равен 976.5625 пс, малый дискрет 125 пс.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Можно сделать вывод, что для прецизионного задания временных соотношений в каналах испытательных систем УВЧ диапазона нужно применять многоустойчивые фазовые элементы триггерного типа. Они имеют принципиально устойчивые дискретные значения задаваемых фазовых сдвигов, малую методическую погрешность и аппаратно просты. При этом должна использоваться скоростная элементная база.

Преимущественное использование арсенид-галлиевой элементной базы определяется более высокой скоростью электронов. В нашей стране на основе арсенида галлия разработаны интегральные схемы, базовые матричные кристаллы серий 6500 – 6504. Низкое качество оксида *GaAs* и высокая плотность поверхностных состояний на границе раздела *GaAs*-изолятор привело к тому, что практическое использование получили полевые транзисторы на основе барьера Шотки (ПТШ). Большая подвижность электронов и высокая скорость насыщения в *GaAs* дают существенный выигрыш в параметрах транзистора.

Существующие модели ионно-имплантированных арсенид-галлиевых полевых транзисторов, на основе которых изготавливаются основная масса СВЧ-приборов и цифровых ИС, показывают значительное улучшение шумовых характеристик в верхней области частотного диапазона. Полевой транзистор на частоте 12 ГГц имеет коэффициент шума менее 0.95 дБ и коэффициент усиления более 11.5 дБ [8]. Кроме того, процент выхода годных ИС делает экономически выгодным серийное изготовление интегральных узлов малого и среднего уровня интеграции на *GaAs*.

В цифровой твердотельной схемотехнике элементы на *GaAs* являются наиболее быстродействующими. В логических схемах на основе ПТШ время задержки распространения сигнала для одного логического элемента менее 10–15 пс при температуре 300 К.

Создан ряд устройств различного функционального назначения. Это ИС запоминающих устройств с временем доступа менее 0.5 нс. Для испытательных систем с преобразованием частоты можно указать на строб-преобразователи на основе фосфида индия (*InP*) [9]. Использование стробпреобразователей с обратной связью позволит обеспечить высокую точность в полосе частот до 60–70 ГГц [10].

Для сверхбыстродействующих ИС разработана многоконтактная система подключения, состоящая из подводящих коаксиальных линий, экранов, полосковых линий разводки с контактами на концах. Её полоса пропускания более 5 ГГц, диапазон температур от 300 К до 4.2 К.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение технического уровня испытательных систем связано с повышением уровня элементной базы. Нужно создавать ИС специального назначения на основе заказных БИС. Так, в системе LT-1000 уже при тактовой частоте 50 МГц и 256-ти двунаправленных каналах, и драйверы, компараторы и синхрогенераторы, устройства для задания формата данных реализованы в двух монолитных заказных БИС на каждый канал и в восьми блоках *pin*-электроники.

Актуальными задачами для построения широкополосных испытательных систем являются разработка методов анализа и проектирования систем фазовой синхронизации с широкополосным преобразованием частоты, а также методов построения функциональных узлов на основе высокоэффективной фазовой синхронизации для систем с высокой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikonov A. V. Analysis of architectures of control equipment designed for testing ultra-high-speed integrated circuits / Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2014. P. 1– 4, DOI: 10.1109 / Dynamics. 2014.7005687. IEEE Conference Publications.
2. Уоллер Л. Заметное укрепление позиций арсенид-галлиевой технологии на рынке сбыта интегральных схем // Электроника. 1988. № 12–13. С. 30–35.
3. Фелдман Р., Роски Д. Систематизированный подход к реализации программируемых задержек // Электроника. 1991. № 11–12. С. 46–53.
4. Баев Е. Ф., Бырылин Е. И. Миниатюрные электрические линии задержки. М.: Сов. радио, 1977. 248 с.
5. Чулков В. А., Федосеев Е. Б. Управляемая электронная линия задержки // Приборы и техника эксперимента. 1984. № 3. С. 123–125.

6. Жилин Н. С. Принципы фазовой синхронизации в измерительной технике. Томск: Радио и связь, 1989. 384 с.
7. Мелешко Е. А. Наносекундная электроника в экспериментальной технике. М.: Энергоатомиздат, 1987. 216 с.
8. Shur Michael. GaAs Devices and Circuits. Plenum Press. New York and London, 1987.
9. Льюис Дав. Особенности изготовления микросхем для осциллографов Agilent Infiniium 90000x и осциллографических пробников Infiniimax III // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2010. № 5. С. 9–10.
10. Никонов А. В. Прецизионная установка амплитуды ВЧ–СВЧ сигналов. Анализ и методы решения: моногр. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. 131 с.

УДК 621:658.512.4.011.56

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ПО ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

А. В. Никонов, А. В. Милых

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Рассмотрена реализация самонастраивающейся адаптивной системы управления, построенной на основе дискретной модели и работающей в условиях неопределённости. Система имеет два контура управления – для воздействия на объект и для формирования сигналов самонастройки. Модель объекта имеет настраиваемые параметры и схожа со структурой объекта управления. Также приведена структура системы, обеспечивающая оценку её параметров. Погрешность управления не превышает 0,5 %. Структура системы позволяет устанавливать оптимальный баланс между быстродействием блока сравнения и быстродействием системы управления.

Ключевые слова: дискретная модель, дискретная система, неопределённость сигналов, самонастройка.

I. ВВЕДЕНИЕ

Применение АСУ производственными процессами опирается на предварительное обследование объекта автоматизации и создания модели, позволяющей учесть состояние объекта управления и параметры самой системы, функционирующей в широком диапазоне эксплуатационных параметров [1]. В [2] показана возможность отражения работы АСУ как аналоговой, так и дискретной моделью и дана оценка точности применяемой модели. Такая возможность использована для управления отдельным технологическим процессом промышленного предприятия, образуя собой ядро управления [3].

Как аналоговая, так и дискретная системы управления имеют свои достоинства и недостатки. В промышленных условиях АСУ работает в широком диапазоне дестабилизирующих факторов, что у аналоговой системы ведёт к нестабильности характеристик. Аналоговые АСУ сложны в применении при дистанционном управлении, требующем протяжённых широкополосных каналов связи. Кроме этого, АСУ относятся к категории «сложных и больших систем», что ведёт к значительным трудностям при их производстве и индивидуальной отладке.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Недостатки аналоговых АСУ устраняются в дискретных системах, когда носителем информации является не аналоговый сигнал, а двоичный код, где информация содержится в данных, имеющих фиксированное логическое значение [4]. Обычно переход к цифровой системе управления начинается с замены аналогового фильтра на цифровой, который также должен обеспечивать динамические характеристики системы управления и помехоустойчивость. Здесь появляется сложность, связанная с заданием шага временной дискретизации по теореме Котельникова и ведущая к большой тактовой частоте микроЭВМ.

Работа системы управления в производственных условиях сопряжена с неопределённостью параметров входных сигналов и помех, которые изменяются во времени. Поэтому для обеспечения эффективности систем управления переходят к самонастраивающимся адаптивным системам. Их параметры и структура подстраиваются под внешние условия, чем обеспечивается квазиоптимальный режим управления.

В [2, 3] показан подход и алгоритм, обеспечивающий реализацию самонастраивающейся системы. Данные, несущие информацию о состоянии объекта управления и собственных параметрах системы управления при

изменении внешних условий, формируют значение управляющего сигнала. Но это необходимо делать в автоматическом режиме. Функциональные узлы, обеспечивающие самонастройку, должны входить в систему управления, так как прогнозировать ход изменений параметров объекта управления и модулей самой системы невозможно.

III. ТЕОРИЯ

На рисунке показана функциональная схема, реализующая подход и алгоритм из [2, 3] для самонастраиваемой системы. Алгоритм самонастройки оценивает отклонения регулируемого параметра объекта от нормы. Система имеет два контура управления – для воздействия на объект управления и для формирования сигналов самонастройки по параметрам «коэффициент передачи контура управления K », «постоянная времени τ » и «чувствительность по амплитуде помехи Z ». Сформированные сигналы управления воздействуют на соответствующие управляемые элементы.

Способ построения самонастраиваемой адаптивной системы управления опирается на положения из [5, 6]. Система управления по дискретной модели позволяет регулятору установить оптимальные параметры в зависимости от режима работы. Происходит оптимизация процесса настройки, а для повышения точности используется компенсационный метод. В функциональной схеме входное воздействие подается на объект и на его модель. Модель объекта имеет настраиваемые параметры. Выходной сигнал объекта сравнивается с выходным сигналом модели, и происходит настройка параметров модели. Автоматическая настройка производится по минимуму рассогласования: недостаток информации об объекте компенсируется настройкой параметров модели объекта. Представляя объект управления как аperiodическое звено, выражение для опорной модели самонастраиваемой адаптивной системы управления в установившемся режиме можно предложить в виде:

$$(1 + p\tau_0)P_O(t) = P_{VH}(t) \cdot K_0,$$

где $P_O(t)$ – опорный сигнал; $P_{VH}(t)$ – сумма управляющего сигнала и помехи.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При численном моделировании дискретной модели системы управления (параметр Z принят равным нулю) при увеличении K погрешность управления не превышает 0,5 %. Увеличение τ ведёт к погрешности управления параметром объекта от пренебрежимо малого значения до 1,5 %. На диапазон изменения параметров K и τ влияют условия устойчивости работы системы управления.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При численном моделировании дискретной модели системы управления (параметр Z принят равным нулю) при увеличении K погрешность управления не превышает 0,5 %. Увеличение τ ведёт к погрешности управления параметром объекта от пренебрежимо малого значения до 1,5 %. На диапазон изменения параметров K и τ влияют условия устойчивости работы системы управления.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Очевидно, блок сравнения должен иметь более высокое быстродействие, чем интервал времени для управления. В структуре нужно устанавливать оптимальный баланс между быстродействием блока сравнения и быстродействием системы управления. То есть блок сравнения должен иметь более высокое быстродействие, чем собственно система адаптивного управления. Но адаптивная система управления будет более быстрой в связи с отсутствием затрат времени на оценку параметров.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опираясь на опорную модель самонастраиваемой адаптивной системы управления в установившемся режиме, необходимо составить уравнение, отражающее систему в процессе подстройки. Это уравнение покажет динамику управления скоростью изменения характеристик объекта (его информативных параметров).

Структура системы с оценкой её параметров с помощью дискретной модели, приведённая на рис. 1, даёт дискретные оценки параметров системы K , τ и Z во времени. Но нужно построить математическую модель системы, работающей в условиях неопределённости и использующую указанные оценки. Для рассмотрения работы адаптивной самонастраиваемой системы управления в динамике в качестве целевой функции нужно принять достижение системой устойчивого состояния, к которому она приводится быстрее, чем это будет происходить в реальности.

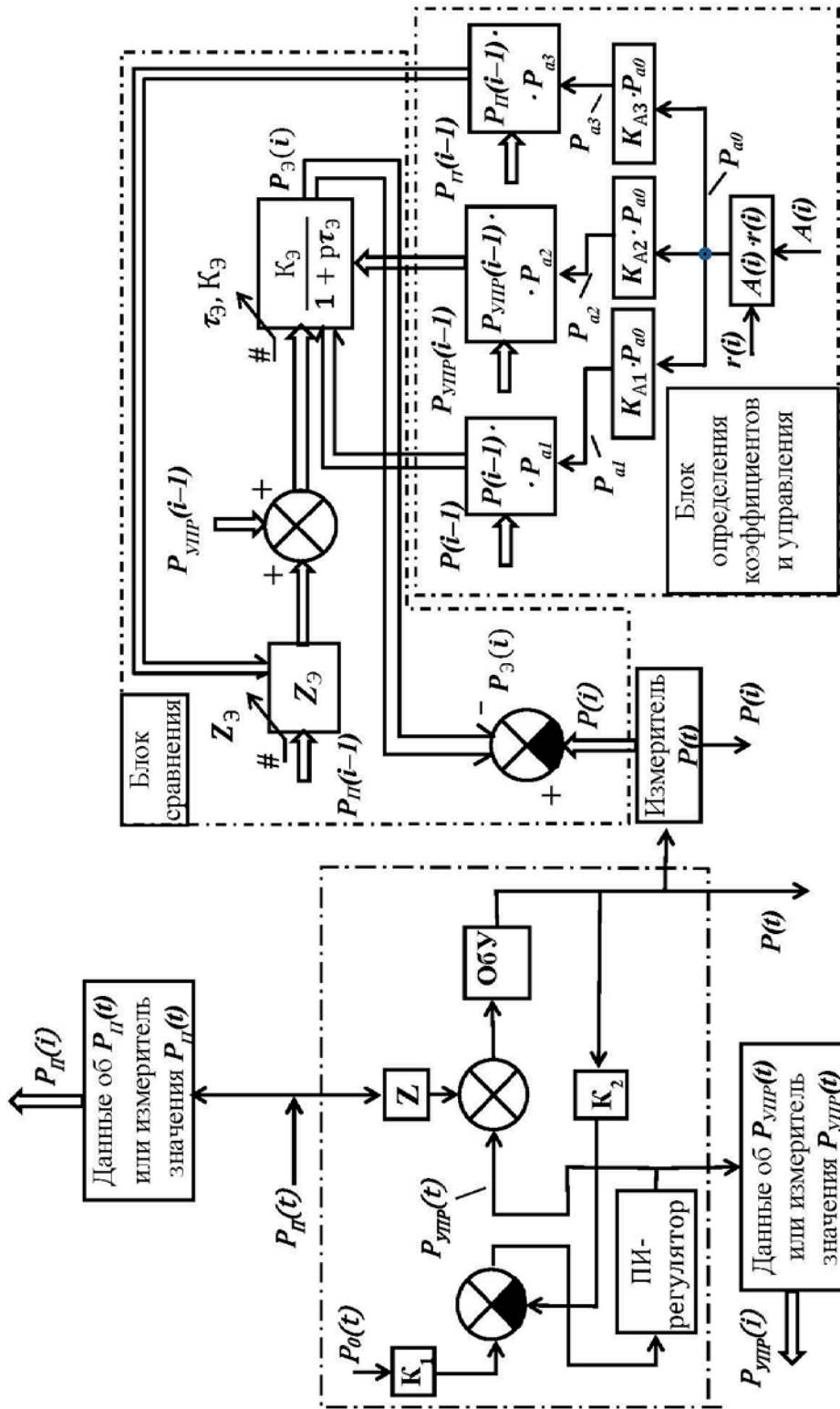


Рис. 1. Структура системы с оценкой её параметров с помощью дискретной модели

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угреватов А. Ю., Угреватов В. Ю. АСУ наружным освещением города // Автоматизация в промышленности. 2011. № 9. С. 16–18.
2. Милых А. В., Никонов А. В. Управление режимами освещения промышленных предприятий // Информационные технологии и автоматизация управления: материалы 6-й Всерос. науч.-прак. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. С. 64–70.
3. Милых А. В., Никонов А. В. Модель автоматизированного управления производственным процессом (освещением) на предприятии // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2015. № 3 (143). С. 268–274.
4. Lawrence R. Rabiner, Gold Bernard. Theory and Application of Digital Signal Processing. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs: New Jersey, 1975.
5. Kuo Benjamin C. Digital Control Systems. Holt, Rinehart and Winston, Inc. New York: Sydney, 1980.
6. Harris C.J., Billings S.A. Self Tuning and Adaptive Control: Theory and Application. Peregrinus on behalf of Institution of Electrical Engineers. London UK, 1985. 362 p.

УДК 004.414

РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ ДЛЯ ДАТЧИКА ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА
КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭКРАНИРОВАННОЙ ТЕМ-КАМЕРЫ

А. В. Осинцев, М. Е. Комнатнов, А. А. Собко
ТУСУР, НИЛ «БЭМС РЭС», г. Томск, Россия

Аннотация – Разработана библиотека для совместной работы прецизионного цифрового датчика температуры MAX31725 с семействами микроконтроллеров ATmega и ARM Cortex по интерфейсу TWI (I²C). Библиотека предназначена для использования в терморегуляторе климатической экранированной ТЕМ-камеры, необходимой для совместных климатических и электромагнитных воздействий на испытуемый объект. Приведены алгоритм, прототипы функций и принцип работы разработанной библиотеки, которая может быть применена для разных микроконтроллеров. Выполнено тестирование библиотеки на микроконтроллерах ATmega328P и ATmega 2560, используемых в терморегуляторе климатической экранированной ТЕМ-камеры.

Ключевые слова: микроконтроллер, датчик температуры, терморегулятор, I²C.

Прецизионные цифровые датчики температуры (ПЦДТ) широко используются в миниатюрной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) для контактных измерений температуры объекта или среды. Преимуществами использования данного вида датчиков являются: компактность, легкость, возможность большого числа измерений температуры объекта (в нескольких точках) используя всего несколько контактов микроконтроллера (МК) по интерфейсам TWI, 1-Wire. В настоящее время немногие производители [1, 2] выпускают ПЦДТ, способные выполнить измерения в диапазоне температур от -50°C до $+150^{\circ}\text{C}$ с точностью от $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ до $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$. Одним из недавно выпущенных миниатюрных ($3 \times 3 \text{ мм}^2$) ПЦДТ является MAX31725 [3]. Он имеет встроенный сигма-дельта АЦП разрешением 16 бит ($0.00390625^{\circ}\text{C}$) и позволяет выполнять измерения в диапазоне температур от -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$, с точностью $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Также наличие интерфейса TWI (I²C) [4] позволяет использовать стандартные команды обмена данными с размещением до 32 ПЦДТ на одной шине TWI (адрес каждого ПЦДТ может быть задан трассировкой линий связи печатной платы [5] между выводами A0, A1, A2, SDA, SCL). Типовая схема включения ПЦДТ MAX31725 по интерфейсу TWI приведена на рис. 1.

Также в ТУСУРе разрабатывается климатическая экранированная ТЕМ-камера [6–8], которая необходима для совместных климатических и электромагнитных испытаний РЭА и компонентов.

Целью данной работы являлась разработка программной библиотеки ПЦДТ MAX31725 для семейства МК ATmega и ARM Cortex, используемых в терморегуляторе климатической экранированной ТЕМ-камеры.

Разработаны алгоритм работы библиотеки ПЦДТ (рис. 2) и её функции (табл. 1). Инициализация интерфейса TWI происходит при включении его аппаратного блока в регистре TWCR и установка скорости обмена данных в регистре TWBR, это действие выполняется при включении терморегулятора [9]. В случае положительного ответа выполняется опрос всех ПЦДТ, подключенных к шине согласно заданным адресам. В случае ошибки,

если не удалось опросить ПЦДТ, вызывается функция обработки ошибок. После того как все датчики найдены, выполняются операции чтения/записи данных в ПЦДТ. Основной задачей разработанной библиотеки является независимость от конечной архитектуры МК, т.е. функции работы с ПЦДТ являются идентичными для всех МК.

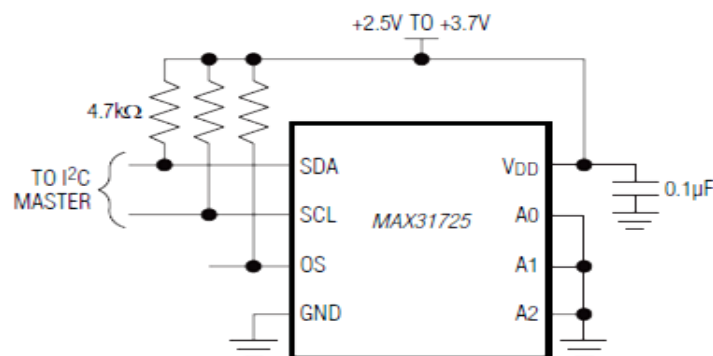


Рис. 1. Схема включения ПЦДТ MAX31725 [10]

ТАБЛИЦА 1
ФУНКЦИИ БИБЛИОТЕКИ

Функция	Описание
void init();	Инициализация ДТ
char scanBus();	Поиск ДТ, подключенных к шине I ² C
void conf(char, byte);	Процедура изменения конфигурации датчика
float readTemp(addr, data);	Чтение данных значения температуры
int testSensor();	Опрос ДТ для проверки целостности системы
void write(addr, data);	Отправка данных в ДТ

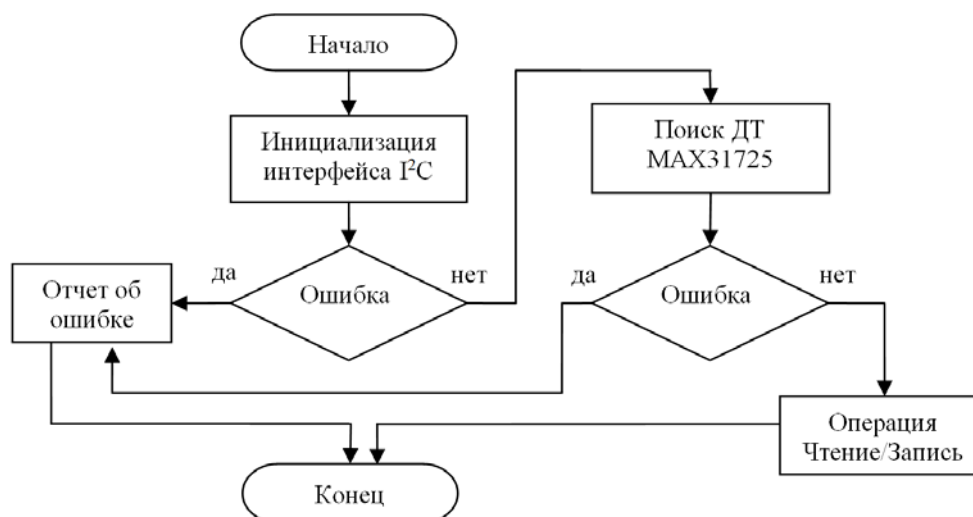


Рис. 2. Алгоритм работы с ДТ MAX31725

Обращение функций библиотеки (см. табл. 1.) к регистрам интерфейса TWI [13] (см. табл. 2) производится посредством аппаратно зависимого кода. Для использования библиотеки в МК другого семейства предусмотрена операция добавления аппаратно зависимых вызовов TWI другого семейства МК (ATtiny, ARM Cortex, PIC и др.) в библиотеку, что позволит разрабатывать переносимый (портируемый) код.

ТАБЛИЦА 2
РЕГИСТРЫ ИНТЕРФЕЙСА TWI

AVR ATmega	ARM Cortex	Описание
TWBR (TWI Bit Rate Register)	TWI_CWGR	Регистр скорости передачи данных
TWDR (TWI Data Register)	TWI_THR	Регистр данных
TWAR (TWI Address Register)	TWI_MMR	Регистр адреса
TWSR (TWI Status Register)	TWI_SR	Статусный регистр
TWCR (TWI Control Register)	TWI_CR	Регистр управления
-	TWI_MMR	Регистр режима ведущего
-	TWI_IADR	Регистр внутреннего адреса TWI
-	TWI_RHR	Регистр временного хранения информации приема
-	TWI_THR	Регистр временного хранения информации передачи

Поскольку в климатической экранированной камере используются МК с разными архитектурами (AVR, ARM), при разработке библиотеки ПЦДТ для MAX31725 учитывалась возможность расширения поддерживаемых МК. Таким образом, структура и функции библиотеки (рис. 3а) остались без изменений (рис. 3б). В библиотеке предусмотрены варианты объединения ПЦДТ в группы для различных режимов работы терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры. Всего в терморегуляторе задействовано 72 ПЦДТ. Для повышения точности измерений температуры ПЦДТ были использованы алгоритмы калибровки и корректировки, в частности, при помощи применения методов компенсации погрешностей достигается существенное повышение точности измерений, которое не всегда возможно достичь при помощи схемотехнических методов [10].

Обращение к ПЦДТ происходит следующими образом: отправка адреса устройства 7 бит и 1 бит операции (0 чтение, 1 запись), затем посылается сигнал стоп, повторный старт с адресом устройства и чтение данных с ПЦДТ.

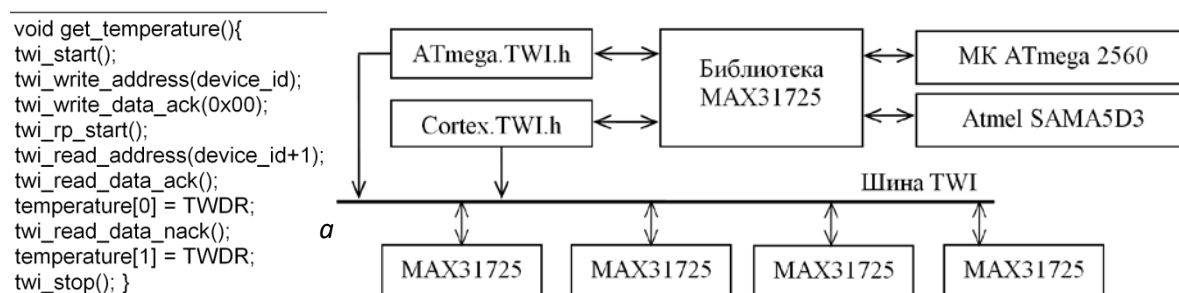


Рис. 3. Функция чтения температуры (а) и структура библиотеки (б) ПЦДТ MAX31725

Таким образом, разработаны алгоритмы и функции, программной библиотеки для работы с ПЦДТ MAX31725 для семейства МК ATmega архитектуры AVR и МК семейства ARM Cortex. С целью проверки корректности выполнения алгоритмов и функций разработанной библиотеки проверена на МК ATmega2560 [11] и ATmega328P. Проведенные тесты показали, что разработанная библиотека содержит достаточный функционал для корректной работы с ПЦДТ MAX31725, а именно: поиск ПЦДТ, чтение показаний температуры, конфигурирование ПЦДТ для изменения режима работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ZMD. URL: <https://www.zmdi.com> (дата обращения: 15.05.2016).
2. Maxim integrated. URL: <https://www.maximintegrated.com/en.html> (дата обращения: 10.05.2016).
3. MAX31725 / MAX31726 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Local Temperature Sensors. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31725-MAX31726.pdf> (дата обращения: 5.02.2016).
4. The I2C-bus and how to use it (including specifications). URL: http://www.i2c-bus.org/fileadmin/ftp/i2c_bus_specification_1995.pdf (дата обращения: 5.02.2016).
5. Osincev A.V., Sobko A. A., Komnatnov M. E. Software Under Control of a Real-Time Operating System for Environmental Shielded TEM-chamber // 17th International Conference of Young Specialists on Micro. Nanotechnologies and Electron Devices. June 30 July 4. 2016.

6. Пат. 2558706 Российская Федерация. Климатическая экранированная камера. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. № 2014103639; заявл. 3.02.14; опубл. 08.07.15.
7. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов // Техника радиосвязи. 2014. № 3 (23). С. 84–91.
8. Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Environmental Shielded TEM Chamber for Biomedical Testing Proc // IEEE International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-Bio 2014). London, 2014. P. 1–3.
9. Osincev A. V., Sobko A. A., Komnatnov M. E. Temperature Controller for External Surface of Waveguide // 12th International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016). 2016. P. 1–4.
10. Клевцов С. И. Источники погрешностей и алгоритмические пути повышения точности измерения температуры датчиками температур // Известия ЮФУ. Ростов-на-Дону. С. 37–44.
11. Atmel A. Tmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V. URL: http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf (дата обращения: 10.01.2016).

УДК 621.376.6

ПРОЦЕДУРА ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕМА

П. И. Пузырев, С. А. Завьялов, А. В. Косых

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Показан вычислительно-эффективный способ быстрого обнаружения сигнала MIL-STD-188-110C App. С по преамбуле. Произведен выбор оптимального порога обнаружителя. Выбраны длина согласованного фильтра и размер банка фильтров по критериям допустимого частотного отклонения и точности восстановления символьной синхронизации. Применение согласованного фильтра на урезанное до 30 символов синхрослово, позволяет сократить количество фильтров в банке с 12 до 3, экономя тем самым на операциях «умножение с накоплением» до 20 раз. Также совместное использование автокорреляционного детектора позволяет снизить вероятность ложного обнаружения до 2-х порядков: $P_{\text{false}} = 3.8e-8$ для модифицированной схемы против $P_{\text{false}} = 1.8e-6$ для немодифицированной при двухлучевом распространении при той же вероятности пропуска синхрослова.

Ключевые слова: обнаружение сигнала, восстановление символьной синхронизации, частотный сдвиг.

1. ВВЕДЕНИЕ

Стандарт цифровой связи MIL-STD-188-110C описывает несколько протоколов передачи цифровых данных в средневолновом и коротковолновом диапазоне для тактической и дальней связи [1]. В приложении «С» представлены требования к последовательному модему со скоростью 2400 бод в полосеголосового канала 3 кГц. Используемая модуляция 8PSK, 16QAM, 32QAM и 64QAM. Информационные скорости с данными типами модуляции и помехоустойчивым кодированием составляют 3200, 4800, 6400, 8000 и 9600 бит/с, а также 12800 без кодирования.

Структура пакета сигнала MIL-STD-188-110C App. С представлена на рис. 1. Преамбула состоит из символов 8PSK и включает в себя две части. Первая часть содержит от 0 до 7 блоков по 184 символа, предназначенных для нормализации уровня в тракте приема (APU). Блоки для первой части получаются путем комплексно-сопряженного преобразования блока второй части. Вторая часть состоит из 287 символов и включает в себя блок из 184 символов (синхрослово) для синхронизации и вычисления доплеровского сдвига (SP), а также блок из 103 символов (RRIP), который несет в себе информацию о скорости передачи данных и настройках приемителя [2].

Задача обнаружения сигнала заключается в установлении факта присутствия сигнала и первичной символьной и кадровой синхронизации, после которой в работу вступают другие блоки обработки и декодирования сигнала.

Большинство способов восстановления несущей (фазовой синхронизации) работают только в случае, когда символьная синхронизация уже работает. То же самое касается алгоритмов эквализации. Это означает, что символьная синхронизация должна быть установлена при наличии неопределенности по частоте и интерференции [3].

Слепые способы восстановления символьной синхронизации с обратной связью имеют достаточно большое время вхождения в синхронизм, поэтому не подходят для первоначальной синхронизации. Наиболее быстрыми являются способы восстановления символьной синхронизации по известной преамбуле [4].

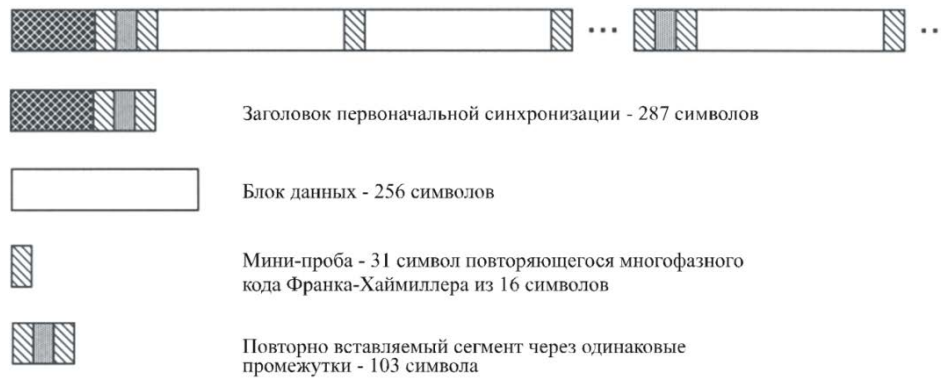


Рис. 1. Структура пакета

Обнаружение сигнала с одновременным восстановлением первичной символьной синхронизации можно осуществить корреляционным способом. Сигнал пропускается через согласованный фильтр, настроенный на известную преамбулу, на выходе которого стоит пороговое устройство. Если сигнал на выходе СФ превышает порог, то считается, что сигнал обнаружен. Далее определяется максимум сигнала, по которому восстанавливается первичная символьная синхронизация. После восстановления первичной символьной синхронизации включается следящая схема синхронизации.

Однако при наличии частотной неопределенности необходимо ставить банк согласованных фильтров, каждый из которых настроен на свою частоту. При этом чем длиннее последовательность, на которую настроен согласованный фильтр, тем выше вероятность корректного обнаружения сигнала и точного восстановления символьной синхронизации. Однако с увеличением длины последовательности также уменьшается допустимый частотный сдвиг, при котором одиночный согласованный фильтр работает. Соответственно, необходимо увеличивать количество согласованных фильтров в банке фильтров.

В данной статье рассматривается вопрос выбора длины последовательности и количество согласованных фильтров в банке, а также структура обнаружителя в целом, при наличии неизвестного частотного сдвига (доплеровского сдвига). Согласно стандарту MIL-STD-188-110С, допустимый доплеровский сдвиг составляет 75 Гц.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим более подробно вторую часть преамбулы, включающую синхрослово SP и блок RRIP. Нормированная автокорреляционная функция синхрослова SP представлена на рис. 2а. По рисунку видно, что последовательность, на основе которой построено синхрослово, имеет очень хорошие корреляционные свойства. Таким образом, вероятность обнаружения данного синхрослова в шуме высока. Однако встает вопрос, как изменится корреляционная характеристика синхрослова при сдвиге частоты. Также необходимо оценить, насколько ресурсозатратно будет построить обнаружитель, не чувствительный к сдвигу частоты.

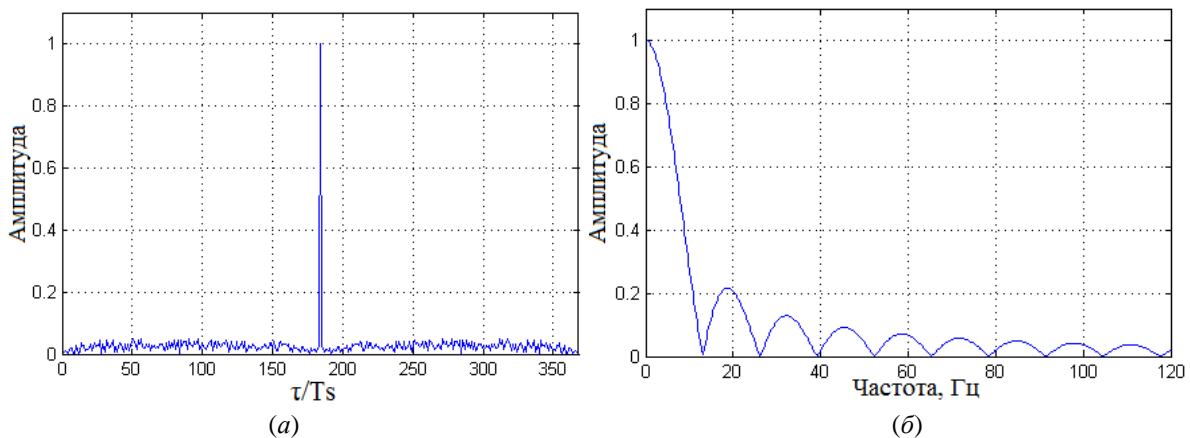


Рис. 2. Нормированная АКФ синхрослова SP (а) и зависимость амплитуды пика нормированной АКФ SP от сдвига частоты (б)

На рис. 26 представлена зависимость амплитуды пика нормированной АКФ SP от сдвига частоты. По рис. 26 видно, что первый минимум располагается в районе 13 Гц. Из этого можно сделать вывод о том, что согласованные фильтры в гребенке должны быть разнесены по частоте с интервалом 13 Гц. Таким образом, на весь диапазон 150 Гц (допустимое отклонение ± 75 Гц согласно стандарту) необходимо 12 согласованных фильтров.

Произведем оценку количества операций умножения с накоплением в секунду при реализации гребенки согласованных фильтров.

$$MAC = SR \times SPS \times Len \times M,$$

где MAC – количество операций умножение с накоплением в секунду, SR – символьная скорость, SPS – количество выборок на символ, Len – количество коэффициентов в согласованном фильтре, M – количество согласованных фильтров в гребенке.

Таким образом, получается, что обнаружитель на гребенке из 12 согласованных фильтров, настроенных на последовательность SP длиной 184 символа, и $SPS=8$ потребует:

$$MAC = 2400 \times 8 \times 184 \times 12 = 42\,393\,600/c.$$

Для сигнальных процессоров средней производительности, например TMS320C5510, гребенка согласованных фильтров займет порядка 10% ресурсов. Для ARM Cortex-M4 микроконтроллеров процедура обнаружения может занять порядка 20-30%. В случае если количество процессов в DSP несколько, помимо процедуры обнаружения, то может возникнуть ситуация нехватки производительности.

Рассмотрим способы уменьшения вычислительной сложности обнаружителя синхрослова MIL-STD-188-110C App.C.

III. ТЕОРИЯ

1. Согласованный фильтр на урезанное синхрослово

Данная идея уменьшения вычислительной сложности реализации обнаружителя заключается в том, что согласованный фильтр настраивается не на всю длину синхрослова, а лишь на ее часть. Свойства синхрослова таково, что острый пик АКФ сохраняется при урезании синхрослова. При этом неважно, какую часть синхрослова брать: начало, середину или конец.

На рис. 3а представлена нормированная АКФ урезанной части синхрослова SP длиной 30 символов (с 155 по 184 символ).

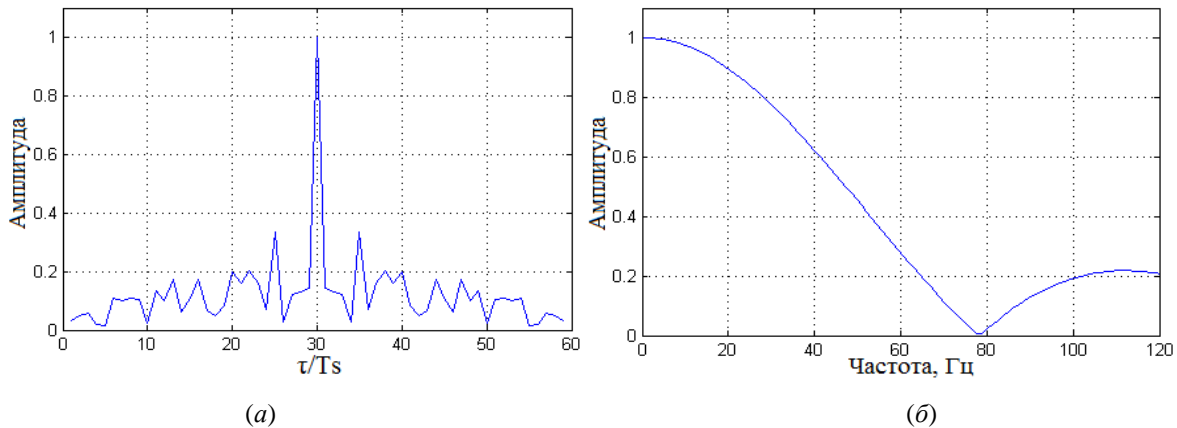


Рис. 3. Нормированная АКФ урезанного синхрослова (30 символов) (а) и зависимость амплитуды пика АКФ от частотной отстройки (б)

На Рис. 3б представлена зависимость амплитуды пика АКФ от частотной отстройки. По рисунку видно, что для диапазона 150 Гц достаточно уже гребенки из 3-х согласованных фильтров.

Произведем оценку количества операций умножения с накоплением в секунду при реализации обнаружителя на 3-х согласованных фильтрах.

$$MAC = 2400 \times 8 \times 30 \times 3 = 1\,728\,000/c.$$

Согласно расчетам выигрыш по производительности составляет порядка 24 раз.

Однако, как будет показано далее в описании результатов моделирования, короткая последовательность имеет достаточно высокую вероятность ложного срабатывания.

2. Обнаружение автокорреляционным способом

Блок RRIP содержит в себе две последовательности Франка–Хаймиллера длиной 31, повернутые на 90 градусов. Вторая последовательность отстаёт от первой на 72 символа. Таким образом, при автокорреляционном приеме с задержкой на время 72-х символов (рис. 4) наблюдается корреляционный пик, вызванный двумя последовательностями Франка–Хаймиллера (рис. 5).

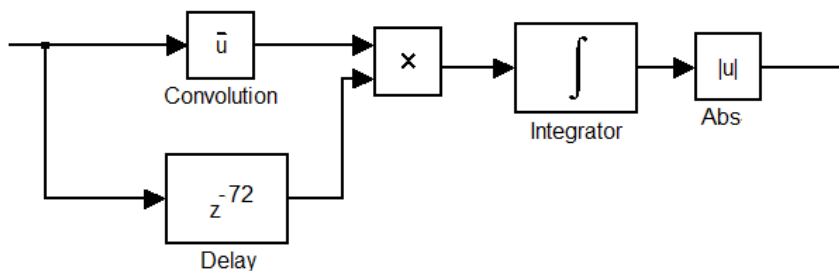


Рис. 4. Автокорреляционный приемник

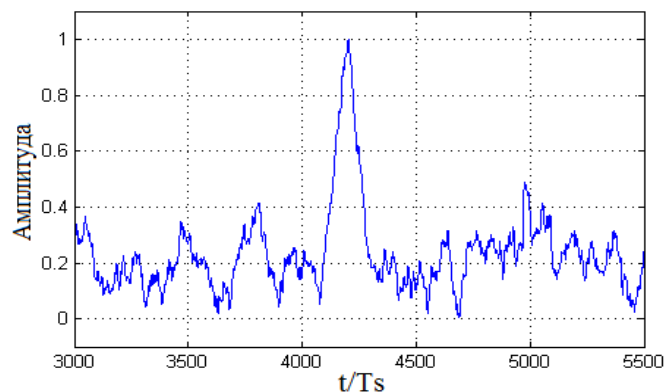


Рис. 5. Отклик автокорреляционного приемника на последовательности Франка–Хаймиллера

Достоинства автокорреляционного обнаружителя заключаются в том, что он требует мало вычислительных ресурсов и нечувствителен к сдвигу частоты сигнала.

К недостаткам можно отнести то, что отклик на выходе автокорреляционного приемника не имеет острого пика. Следовательно, данный сигнал нельзя использовать для первичной символьной синхронизации.

IV. ПРЕДЛОЖЕНИЕ НОВОЙ СТРУКТУРЫ ОБНАРУЖИТЕЛЯ

В данной работе предлагается объединить достоинства обоих способов обнаружения. Автокорреляционный способ обеспечивает стабильность обнаружения наличия синхрослова при нестабильности частоты несущей и многолучевом распространении. Обнаружитель на базе корреляторов при этом обеспечивает требуемое разрешение по времени для первичной символьной синхронизации. Согласованные фильтры настроены на урезанное синхрослово (30 символов). Предложенная структура обнаружителя представлена на рис. 6.

На рис. 7–10 представлены осциллограммы в различных точках разработанного обнаружителя. На рис. 7 и 8 представлен сигнал с выхода автокорреляционного детектора до и после порогового устройства соответственно. На рис. 9 представлен сигнал на выходе одного согласованного фильтра банка. На рис. 10 представлен сигнал на выходе согласованного фильтра, определенный только на интервале, на котором сигнал автокорреляционного детектора выше порогового значения. Далее на этом интервале выбирается максимальное значение среди всех сигналов согласованных фильтров банка и определяется индекс максимума, по которому осуществляется первичная символьная синхронизация.

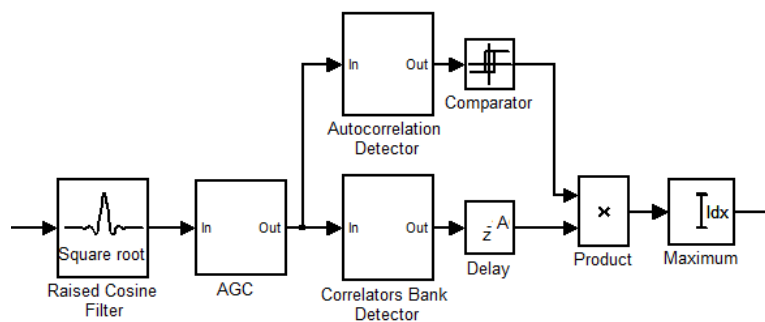


Рис. 6. Структура предложенного обнаружителя для модема MIL-STD-188-110С App.C

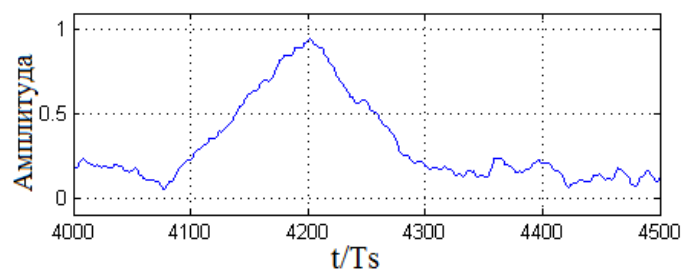


Рис. 7. Отклик автокорреляционного обнаружителя до порогового устройства

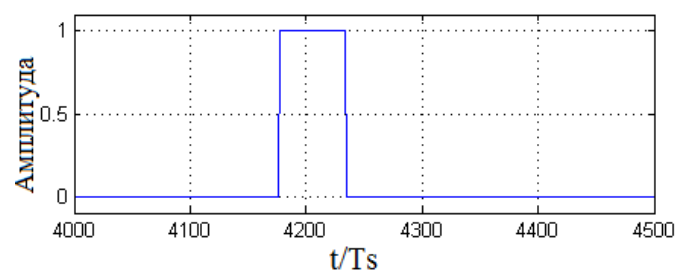


Рис. 8. Отклик автокорреляционного обнаружителя после порогового устройства

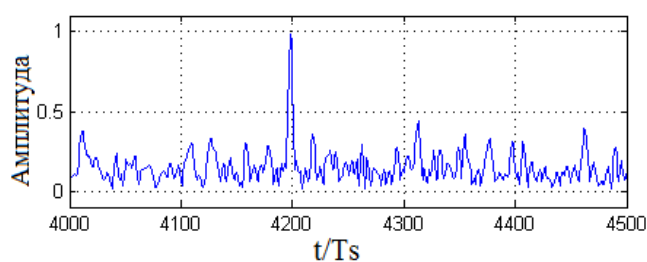


Рис. 9. Отклик согласованного фильтра

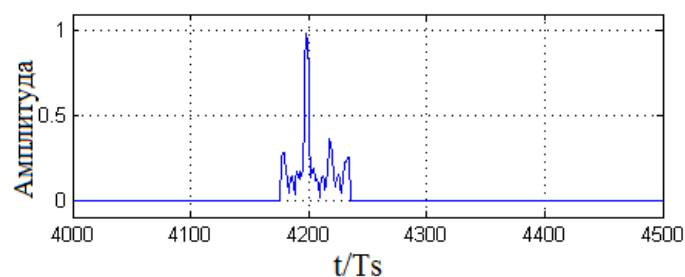


Рис. 10. Отклик на выходе предложенного обнаружителя

Произведем оценку эффективности обнаружения предложенной структурой обнаружителя и сравним ее с эффективностью обнаружения немодифицированным банком корреляторов.

Моделирование проводилось для двух случаев: однолучевого и двухлучевого распространения. Сигнал/шум, равный $E_b/N_0 = 6$ дБ, был выбран из тех соображений, что при меньшем отношении с/ш уже нет необходимости обнаруживать сигнал, т.к. в любом случае не будет уверенного приема 8-PSK сигнала. Для $E_b/N_0 = 6$ дБ и 8-PSK модуляции вероятность ошибки составит $P_e = 0.02$. Сдвиг частоты сигнала равен половине разности частот, на которые настроены соседние корреляторы, что является наихудшим случаем.

Сигнал перед поступлением на обнаружитель нормируется до единичной мощности. Так как нормализация сигнала происходит по групповому сигналу, имитируя тем самым работу АРУ, то при двухлучевом распространении мощность одного луча на входе обнаружителя уменьшается. Это приводит к тому, что увеличивается вероятность пропуска синхрослова. Так, на рис. 11 представлены плотности распределения вероятности для синхрослова (P_s) и случайных данных (P_d) для обнаружителя только на банке согласованных фильтров. По рис. 11а видно, что в случае однолучевого распространения оптимальным является порог $L \approx 0.6$. В случае двухлучевого распространения (рис. 11б) оптимальный порог будет $L \approx 0.52$, при этом вероятность пропуска синхрослова будет значительно выше, чем при однолучевом распространении.

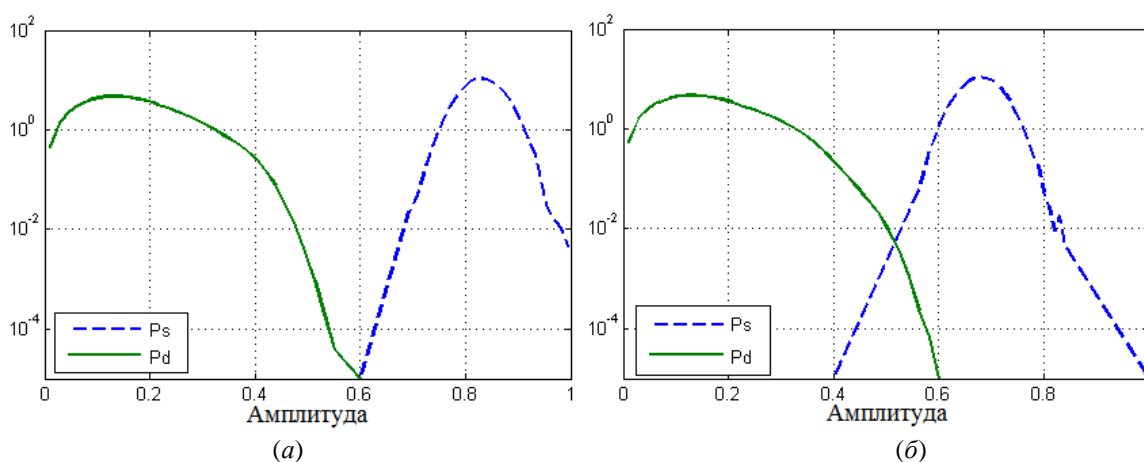


Рис. 11. Плотности вероятности при однолучевом (а) и двухлучевом распространении (б)

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Вероятность пропуска синхрослова для обоих видов рассматриваемых обнаружителей одинакова и составляет $P_{\text{pass}} = 8.6e-6$ при однолучевом распространении и $P_{\text{pass}} = 1.4e-5$ при двухлучевом соответственно. Однако вероятность ложного обнаружения для предложенной структуры обнаружителя меньше более чем на два порядка и составляет $P_{\text{false}} = 3.8e-8$ при двухлучевом распространении, против $P_{\text{false}} = 1.8e-6$ для обнаружителя на банке согласованных фильтров. При однолучевом распространении выигрыш по вероятности ложного обнаружения уже не столь большой и составляет $P_{\text{false}} = 8.3e-8$ для предложенного обнаружителя и $P_{\text{false}} = 4.2e-8$ обнаружителя на банке согласованных фильтров.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная структура обнаружителя является эффективной с точки зрения вычислительных затрат на обработку в ЦСП или ПЛИС. Выигрыш по сравнению с оптимальным обнаружителем на 12 согласованных фильтрах для полной последовательности составит порядка 20 раз. При этом обеспечиваются достаточно низкие вероятности пропуска синхрослова и ложного обнаружения. При отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 6$ дБ предложенный обнаружитель позволяет добиться уверенного обнаружения сигнала, достаточного для практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MIL-STD-188-110C. Military Standard. Interoperability and Performance Standards for Data Modems. 23 SEPTEMBER. 2011.
2. Ямпольский А. А., Дунаев А. С., Семашко А. В. Алгоритм текущей оценки занятости канала сигналами MIL-STD-188-110 // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2.
3. Proakis John. Digital Communications. McGraw-Hill, 1995. Inc.

4. Shayesteh M. G., Amindavar H. Multi user detection in CDMA system using neural network approach // International standard of Electronics and communications. 2004. 54. P. 215–235.
Koulakiotis, A. H. Aghvami. “Data detection techniques for DS/CDMA mobile systems: A review”. IEEE Pers. Commun., 7:24–34, 2000

УДК 004.93

РАСПОЗНАВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПЛОСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПРИЗНАКОВ ИХ ВЫПУКЛЫХ ОБОЛОЧЕК

С. С. Садыков, Я. Ю. Кульков

Муромский институт Владимирского государственного университета, г. Муром, Россия

Аннотация – В статье предложен новый подход к решению известной задачи распознавания плоских объектов, основанный на алгоритмах предварительной обработки изображений и формирования безразмерных признаков реальных плоских объектов на базе параметров площади, контура, выпуклой формы и выпуклой оболочки их бинарных изображений, а также на методе распознавания по принципу ближайшего соседа, когда близость эталона и входного объекта определяется путем вычисления СКО между их векторами-признаками. Даны результаты экспериментов. Определены пути дальнейших исследований.

Ключевые слова: изображение, распознавание, безразмерный признак, плоский объект, выпуклая оболочка, контур, система технического зрения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка и практическое применение систем технического (СТЗ) зрения актуально особенно для промышленности, так как роботизированные комплексы, оснащенные СТЗ позволяют автоматизировать многие технологические операции, повысить производительность – важный фактор для конкурентоспособности выпускаемой продукции и освободить человека от рутинных и тяжелых работ [1].

Хотя к настоящему времени накоплена обширная литература, посвященная различным теоретическим и прикладным вопросам машинной обработки, анализу и распознаванию полутоновых и бинарных изображений и объектов на них в различных областях [2–6]. При разработке СТЗ конкретного назначения приходится адаптировать существующие или создавать новые подходы, методы и алгоритмы обработки, анализа и распознавания изображений и объектов на них [1,3,7].

Подавляющее большинство существующих СТЗ осуществляют анализ и распознавание бинарных изображений [1,3,7].

Фундаментальным структурным элементом как полутоновых, так и бинарных изображений являются контурные линии [5]. Поэтому характеристики контура объектов на изображении во многих случаях используются как основной признак для классификации объектов по их изображениям [1,3–5] и, надо отметить, успешно решаются практические вопросы распознавания плоских объектов [1]. Наряду с характеристиками контура можно использовать параметры линейчатых структур, формируемых вокруг бинарных изображений объектов, такие как линии описанного прямоугольника [2] или выпуклой оболочки.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе для распознавания разных реальных плоских объектов предлагается использовать признаки, созданные в основном на базе характеристик выпуклых оболочек, построенных вокруг бинарного изображения как некоторого точечного множества на плоскости.

Цель данной работы – это моделирование на компьютере технологии работы СТЗ при сортировке плоских деталей и определение возможности использования предлагаемых безразмерных признаков, сформированных в основном их характеристик выпуклых оболочек бинарных изображений, для классификации различных реальных плоских объектов с высокой точностью за заданное время.

III. ТЕОРИЯ

Распознаванию подлежат детали, которые располагаются на ленте транспортёра и имеют произвольные ориентации. Фон, на котором регистрируются изображения деталей, можно считать равномерным, а условия освещения – безтеневым.

Технология распознавания состоит из двух этапов – обучения и распознавания. Экспериментальные исследования проводились на полутоновых изображениях реальных объектов (детали и изделия).

Примеры изображений отдельных реальных плоских объектов (ОРПО) приведены на рис. 1.



Рис. 1. Полутоновые изображения реальных объектов

Выделение одноточечного безразрывного контура бинарного изображения осуществляется алгоритмом направленного перебора [9].

Построение выпуклой формы изображения объекта проводится с использованием алгоритма последовательного устранения вогнутых участков изображения объекта [10].

Для 10 заданных объектов формируется 3600 повернутых вариантов изображений.

Путем случайного выбора, например, по нормальному закону, из 360 вариантов повернутых изображений каждого заданного объекта формируется презентабельная экспериментальная выборка объемом 2000 изображений объекта. Для 10 заданных объектов формируется массив из 20 000 вариантов изображений. Строится гистограмма частоты использования 360 повернутых изображений каждого объекта для формирования 2000 изображений

Для каждого бинарного изображения строится его выпуклая форма [10]. Используя алгоритм в [9], выделяются выпуклые оболочки, представляющие собой контур выпуклой формы.

Для всех изображений вычисляются первичные параметры на основе алгоритма, приведенного в [10]. По полученным первичным параметрам осуществляется расчет векторов безразмерных признаков каждого из 2000 реализаций всех 10 ОРПО по формулам, приведенным в [10].

Далее в диалоговом режиме осуществляется выбор эталонов для распознавания каждой из 2000 реализаций каждого из ОРПО. По гистограммам, полученным на этапе генерации, выбирается вектор признаков самой часто использованной из 360 повернутых вариантов при формировании 2000 реализаций. Для данного вектора коэффициентов по методу среднеквадратичного отклонения вычисляется Z_i с каждой из 2000 реализаций. Среди них ищутся Z_{min} . Найденные значения Z_{min} указывают номера реализаций среди 2000 изображений, вектора-признаки которых совпадают с вектором-признаком выбранной как эталон реализации. Аналогично, выбор эталонов проводится для всех остальных реализаций ОРПО.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты выбора эталонов для 2000 реализаций каждого из 10 ОРПО приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
КОЛИЧЕСТВО ЭТАЛОНОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОРПО

№ ОРПО	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кол-во эталонов	10	11	3	18	21	11	19	4	7	19

Следующим шагом осуществляется экзамен обученной системы на 20000 реализациях ОРПО. Экзамен заключается в сравнении векторов признаков всех реализаций всех 10 ОРПО с выбранными эталонами.

В табл.2 приведены результаты правильного распознавания.

ТАБЛИЦА 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАВИЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ЭКЗАМЕНЕ ВСЕХ РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ КОЛИЧЕСТВЕ ЭТАЛОНОВ ОТ 1 ДО 21 НА КАЖДЫЙ ОБЪЕКТ

№ объек-та	Кол-во испытаний	Количество эталонов					
		1		10		21	
		кол-во	% расп.	кол-во	% расп.	кол-во	% расп.
1	2000	1050	52,5	2000	100	2000	100
2	2000	728	36,4	1903	95,1	2000	100
3	2000	1827	91,3	2000	100	2000	100
4	2000	570	28,5	1411	70,5	2000	100
5	2000	602	30,1	1208	60,4	2000	100
6	2000	868	43,4	1911	95,5	2000	100
7	2000	561	28,0	1165	58,2	2000	100
8	2000	1799	89,9	2000	100	2000	100
9	2000	608	30,4	2000	100	2000	100
10	2000	472	23,6	1201	60,0	2000	100

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установлена принципиальная возможность использования безразмерных признаков, полученных на основе параметров площади, контура и выпуклой оболочки бинарного изображения, для распознавания с требуемой точностью реальных плоских деталей и изделий.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольшее количество эталонов понадобилось для распознавания всех реализаций реального объекта под номером 5. Это обусловлено тем, что при генерации повернутых экземпляров образуются изображения, имеющие несимметричную форму. Поэтому формируемые выпуклые оболочки сильно отличаются между собой. Те же рассуждения справедливы также для реальных объектов с номерами 7 и 10. При вращении изображения получаем различные соотношения линейных участков выпуклой оболочки, а также параметров контура.

Используемая для проведения экспериментов программа не подвергалась оптимизации. При вычислении исходных параметров дважды выделяется контур, сначала по исходному изображению, потом по выпуклой форме. При этом используемый алгоритм направленного перебора требует программной оптимизации для уменьшения затрат времени. Для минимизации времени распознавания одного планируется проведение дополнительных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническое зрение роботов/Под ред. А. Пью. Пер. с англ. Под ред. Г. П. Катуса. М.: Машиностроение, 1987. 300 с.
2. Претт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. / У. Претт. М.: Мир, 1982. Кн.1. 347с. Кн.2. 480 с.
3. Путятин Е. П. Обработка изображений в робототехнике / Е. П. Путятин, С. В. Аверин. – М.: Машиностроение, 1990. – 320с.
4. Бутаков Е. А. Обработка изображений ЭВМ / Е. А. Бутаков, В. И. Островский, И. Л. Фадеев. М.: Радио и связь, 1987. 240с.
5. Фурман Я. А. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. 248 с.
6. Обработка цифровых аэрокосмических изображений для геоинформационных систем: монография / С. Г. Емельянов, С. Ю. Мирошниченко, В. С. Панищев [и др.]. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 176с.
7. Техническое зрение роботов / В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов, Ю. Г. Якушенков : Под общ. ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1990. 272с.
8. Гридин В. Н. Адаптивные системы технического зрения / В. Н. Гридин, В. С. Титов [и др.]; Центр информ. технологий в проектировании РАН. М.: Наука, 2009. 441с.
9. Фурман Я. А. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1992. 248 с.
10. Садыков С. С. Алгоритм построения выпуклой оболочки бинарного изображения и формирование его безразмерных признаков / С.С. Садыков // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2015. № 2 (31). С.77–85.

УДК 681.586.7

ТРЕХКООРДИНАТНЫЙ ДАТЧИК УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА
С БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ИНФОРМАЦИИК. Р. Сайфутдинов¹, И. К. Сайфутдинов²¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия²Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск, Россия

Аннотация – Определение углового положения и перемещения (приближения) объекта с высокой точностью и возможностью беспроводной передачи информации в настоящее время востребовано во многих областях науки и техники. Применение современной элементной базы позволило существенно повысить разрешающую способность и точность измерений, прием и обработку данных с последующим хранением в энергонезависимой памяти и передачей полученных результатов потребителю в соответствии с протоколом Bluetooth Low Energy. Разработан, изготовлен и испытан опытный образец датчика, разработано программное обеспечение, получены экспериментальные данные. Применение литиевого источника питания и специализированного DC/DC преобразователя позволяет эксплуатировать датчик без замены батареи в течение не менее трех лет.

Ключевые слова: трехкоординатный датчик, акселерометр, микроконтроллер, угловое положение объекта

I. ВВЕДЕНИЕ

При решении широкого круга задач в различных областях науки и техники необходимо производить прецизионные измерения величин угловых перемещений разного рода объектов. Для этого часто применяются оптические абсолютные датчики углового положения, формирующие кодированный выходной сигнал, который индицирует абсолютное угловое положение контролируемого объекта [1]. Достаточно высокая степень защищенности исполнения датчиков, а также высокая устойчивость к внешним воздействиям позволяют применять их в робототехнических комплексах, манипуляторах сварочных роботов на полностью автоматизированных линиях автомобильных заводов и т.п. [2].

В настоящее время разработаны принципиально новые конструкции датчиков на основе применения технологий и материалов микроэлектроники, что позволило достичь высокой повторяемости физико-механических свойств и геометрических параметров основных конструктивных элементов, существенно снизить погрешность, массогабаритные показатели, энергопотребление и стоимость датчиков.

Использование современных микропроцессоров позволяет проводить предварительную обработку измерений, получать от датчиков и выдавать не аналоговый, а цифровой сигнал, устранить значительную часть систематических погрешностей, проводить самодиагностику и т.п. [3].

Также актуальной является задача съема и передачи информации об угловом положении объекта для последующей обработки и выдачи данных.

Новейшие разработки в области микроэлектроники позволяют создавать миниатюрные датчики углового положения объекта с беспроводной передачей информации и питанием от автономного источника (аккумулятор или батарея питания).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве датчики движения и позиционирования применен современный трехосевой акселерометр компании STMicroelectronics, отличающийся своим ультранизким энергопотреблением. Диапазон измерений акселерометра – $\pm 2g/\pm 4g/\pm 6g/\pm 8g/\pm 16g$, частота следования отсчетов измерений – 3.125 Гц...1.6 кГц. Акселерометр может быть настроен на распознавание определенных последовательностей событий и генерацию прерываний по их обнаружению, передачу цифровых данных на выход через интерфейсы I²C или SPI [4].

Основные характеристики LIS3DSH: рабочий температурный диапазон: $-40...85^{\circ}\text{C}$; независимые выводы питания акселерометра и линий ввода-вывода; потребление в режиме LowPower – менее 11 мкА; I²C-/SPI-интерфейс; шестнадцатититные выходные данные; перегрузки до 10000 g; встроенный датчик температуры; программируемый автомат; три дополнительных канала АЦП [5].

Датчик подходит для автономных изделий, которые должны включаться только во время движения (распознавание движения). Акселерометр LIS3DSH может использоваться для определения ориентации прибора, измерения вибрации, распознавания ударов и свободного падения, а также в интерфейсах человек-машина.

Функцию снятия и обработки данных с акселерометра с последующей передачей информации об угловом положении объекта выполняет микроконтроллер компании Texas Instruments CC2640F128RNB [6] со встроенным RF приемопередатчиком на 2.4 ГГц, совместимым со стандартом передачи данных Bluetooth Low Energy, версия стандарта протокола 4.2.

Поддерживаемые интерфейсы – UART, GPIO, ADC, PWM, SPI, I²C, RTC, AES-128; скорость передачи данных (макс) 1 Мбит/с; напряжение питания +1.8...3.8 В; программируемая выходная мощность передатчика 5 дБ; чувствительность приёмника не ниже –97 дБ.

В качестве источника питания датчика используется литиевая батарея с номинальным напряжением + 3.6 В.

Компания Texas Instruments выпустила недорогой сверхмаломощный повышающий преобразователь TPS61291 с возможностью выбора выходного напряжения и интегрированной функцией байпаса [7]. В режиме байпаса устройство обеспечивает прямой путь питающего напряжения от батареи до входа в систему и позволяет микроконтроллеру работать на малой мощности, непосредственно от одного 3 В Li-MnO₂ аккумулятора или двух щелочных батарей. Данное решение подходит для приборов с батарейным питанием, в которых ток потребления крайне мал; однако периодически требуется кратковременное получение от источника питания довольно большой мощности, например, для питания радиоканала раз в несколько минут или даже реже, а всё остальное время питание потребляет только микроконтроллер [8].

Дополнительные функциональные возможности устройства обеспечивает применение микросхемы MAX44000 компании Maxim, совмещающей в себе датчик уровня освещенности (Ambient Light Sensor – ALS) с широким динамическим диапазоном и ИК-датчик приближения [9]. В качестве фоточувствительных элементов используются фотодиоды, сигналы которых после преобразователей «ток–напряжение» с управляемым усилением поступают на два 14-битных АЦП. Результаты преобразования сохраняются в регистре данных и доступны для чтения по интерфейсу I²C [10].

Излучателем является инфракрасный светодиод SFH484-2, работающий на длине волны 880 нм с углом расхождения луча 8° и мощностью излучения 25 мВт.

III. ТЕОРИЯ

На рис.1 приведена структурная схема трехкоординатного датчика углового положения объекта.

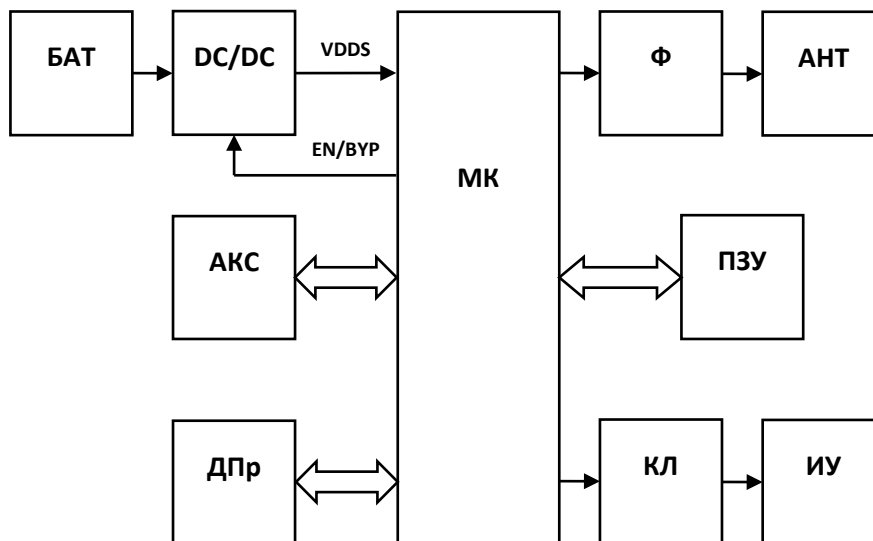


Рис. 1. Структурная схема трехкоординатного датчика углового положения объекта

Функцию сбора, обработки и передачи информации об угловом положении и перемещении (приближении) объекта выполняет микроконтроллер (МК) CC2640F128RNB. Передача данных осуществляется через фильтр Ф с помощью антенны АНТ компании AMOTECH типа ALA621C4 на диапазон 2.4 ГГц.

К МК подключены по протоколу I²C акселерометр АКС (LIS3DSH), измеряющий угловое положение объекта, датчик приближения (MAX44000), определяющий расстояние до объекта, микросхема энергонезависимой «флеш» памяти SST25VF010A с объемом памяти 1 Мбит (протокол SPI), служащая для хранения данных и ключ КЛ на основе быстродействующего полевого транзистора для управления исполнительным устройством ИУ.

Питание устройства осуществляется от литиевой батареи БАТ с номинальным напряжением +3.6 В и преобразователя постоянного напряжения DC/DC на основе микросхемы TPS61291, управляемой МК, обеспечивающего оптимальный режим работы батареи во время снятия информации с датчиков и передачи полученных и обработанных МК данных потребителю в соответствии с протоколом Bluetooth Low Energy, версия стандарта протокола 4.2.

Программное обеспечение состоит минимум из трех частей:

- программа прошивки микроконтроллера МК, обеспечивающая опрос датчиков и снятие с них данных, обработку, хранение и передачу данных потребителю;
- программа для устройства приема, расшифровки и обработки полученных данных;
- программа, управляющая непосредственно исполнительными механизмами в соответствии с заданными потребителем алгоритмами работы с объектом.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В соответствии со структурной схемой разработана электрическая принципиальная схема устройства, на основании которой изготовлены и испытаны опытные образцы трехкоординатных датчиков углового положения и перемещения (приближения) объекта.

Датчик реализован в виде трехслойной печатной платы диаметром 33 мм. Для обеспечения согласования волнового сопротивления антенны АНТ между верхним и внутренним проводящими слоями печатной платы толщина слоя диэлектрика составляет 0.175 мм. Соответственно, между внутренним и нижним проводящими слоями толщина слоя диэлектрика составляет 0.72 мм. Толщина каждого из проводящих слоев печатной платы – 0.035 мм. Таким образом, общая толщина печатной платы равна 1 мм. Внешний вид опытного образца датчика представлен на рис. 2.

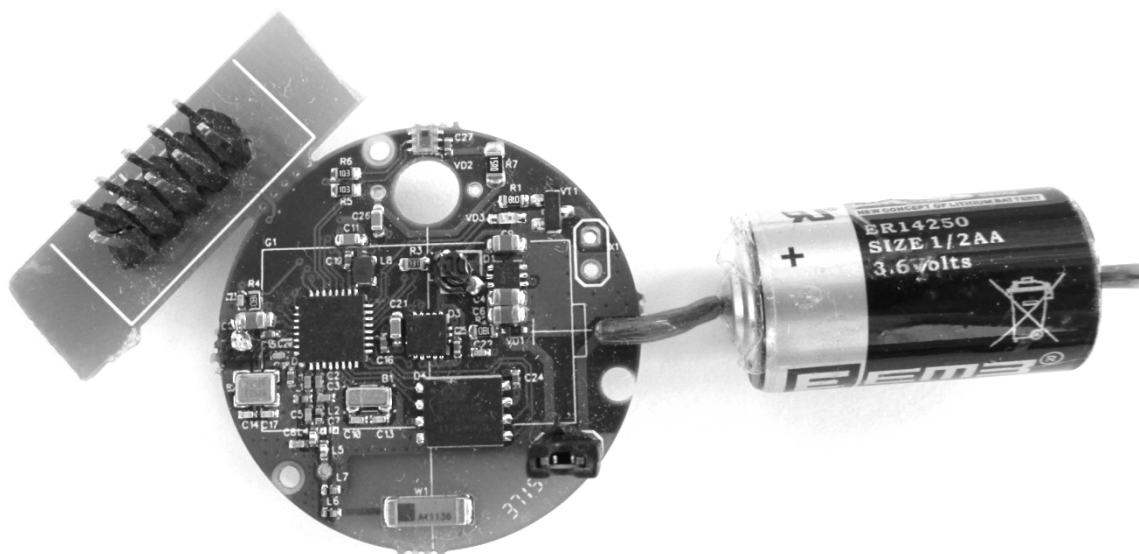


Рис. 2. Внешний вид опытного образца трехкоординатного датчика углового положения объекта

Разъем внутрисхемного программирования после «прошивки» микроконтроллера МК отламывается от основной платы датчика. Для этого предусмотрена перфорация места соединения плат датчика и разъема программирования.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перед началом эксплуатации датчика необходимо произвести программную калибровку вычисления угла поворота вокруг неподвижной оси по трем координатам, задающим его ориентацию относительно Земли.

Область всех одновременных значений координат неподвижного акселерометра представляет собой эллипсоид с центром в начале декартовой системы координат. Ориентацию акселерометра относительно Земли характеризуют значение трех координат, поэтому интерпретацией этого положения будет точка с тремя координатами.

Для определения угла поворота датчика относительно неподвижной оси необходимы условия: при вычислении угла акселерометр должен быть неподвижен; перед определением угла поворота программа, которая его вычисляет, должна быть откалибрована.

Первый этап калибровки: по показания акселерометра в трех разных положениях определяются три точки, каждая из которых характеризует свою собственную единственную ориентацию устройства относительно оси вращения. По этим трем точкам строится плоская поверхность, определяется угол её поворота вокруг осей координат и сдвиг её от начала координат, по вычисленным данным уравнение, задающее эллипсоид, изменяется так, что все входные данные, координаты точки в пространстве преобразовывались в удобный вид, координаты точки на плоскости для определения угла поворота вокруг оси. Таким образом, получается эллипс, координаты точек которого задают ориентацию акселерометра относительно оси вращения. Результатом первого этапа калибровки являются необходимые преобразования входных данных для последующей интерпретации их в угол поворота относительно ориентации, заранее выбранной за начальное значение нулевого угла.

Данные, полученные посредством вращения акселерометра вокруг разных осей, были отфильтрованы и аппроксимированы эллипсоидом. Уравнение эллипсоида, используемое для аппроксимирования:

Данные, полученные посредством вращения акселерометра вокруг разных осей, были отфильтрованы и аппроксимированы эллипсоидом. Уравнение эллипсоида, используемое для аппроксимирования:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1,$$

где a, b, c – полуоси эллипсоида.

По вычисленным значениям a, b, c был построен график (рис. 3) с использованием следующих уравнений:

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos(u) \cdot \cos(v) \\ y = b \cdot \cos(u) \cdot \sin(v) \\ z = c \cdot \sin(u) \end{cases},$$

где u, v – полярные углы при осях Ox и Oy .

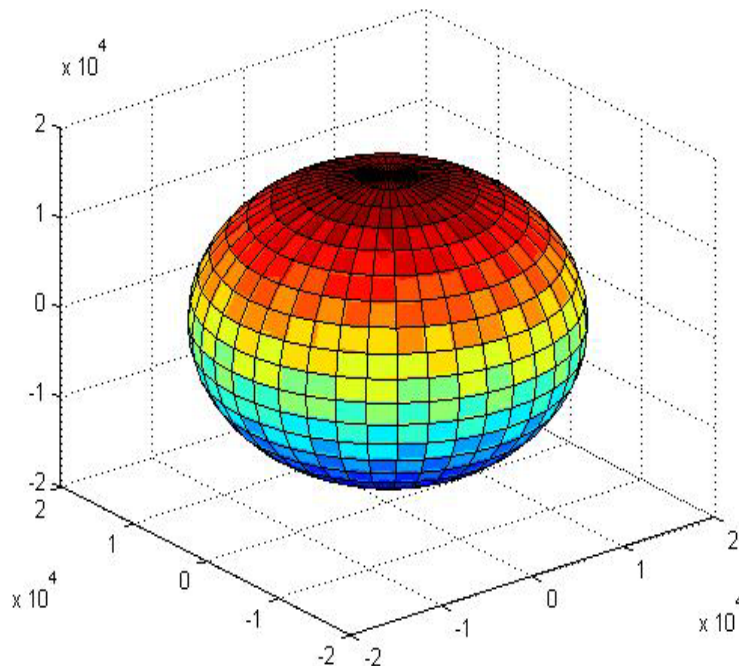


Рис. 3. График значений датчика углового положения объекта относительно Земли

Второй этап калибровки задает точность, с которой необходимо определить угол поворота и то положение относительно неподвижной оси вращения, при которой угол поворота будет считаться нулевым. Алгоритм второго этапа: полученный ранее эллипс разбивается на участки в зависимости от градуировки углов в соответствии с введенной пользователем точностью определения угла поворота. Результатом второго этапа калибровки является метод определения угла по преобразованным входным данным.

При такой калибровке удастся избежать помех из-за отклонения выбранного положения акселерометра от заданного стандартного его положения при его фиксации. Если же положение самой оси вращения изменяется во времени, то данный алгоритм калибровки не дееспособен. В этом случае необходимо учитывать ориентацию оси вращения относительно того её положения, в котором проводилась последняя калибровка.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный трехкоординатный датчик углового положения и перемещения (приближения) объекта с беспроводной передачей информации может быть использован в различных областях науки и техники, в частности, в робототехнике, станкостроении, обнаружении и подведении объекта к обрабатываемому станку и т.п.

В настоящее время идет разработка следующих версий таких датчиков с устранением выявленных недостатков. Диаметр печатной платы упрощенной версии датчика без функции определения перемещения (приближения) объекта составляет всего 23 мм, что позволяет использовать ее в труднодоступных местах и в случаях ограничения массогабаритных показателей для объекта применения датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданкин В. К. Абсолютные датчики углового положения с интерфейсом SSI // Современные технологии автоматизации. 2004. № 1. С. 51–57.
2. Жданкин В. К. Поворотные шифраторы: основные типы и некоторые особенности применения // Современные технологии автоматизации. 2001. № 2. С. 68–79.
3. Азаров В. Н., Каперко А. Ф. Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления // Приборы и системы управления. 1998. № 5. С. 15–30.
4. H. Qu, D. Fang, H. Xie A. Monolithic CMOS-MEMS 3Axis Accelerometer with a Low-Noise. Low-Power Dual Chopper Amplifier // IEEE Sensors Journal. September. 2008. Vol. 8, no. 9. P.1511–1518.
5. Калачев А. В. Акселерометры STMicroelectroics: определяя любое движение // Новости электроники. 2014. № 6. С. 13–17.
6. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2460.pdf>
7. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61291.pdf>
8. Yihua Hu, Rong Zeng, Wenping Cao, Jiangfeng Zhang, Stephen J. Finney. Design of a Modular. High Step-Up Ratio DC–DC // Converter for HVDC Applications Integrating Offshore Wind Power. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63, no.4. P. 2190–2202. DOI: 10.1109/TIE.2015.2510975.
9. Cheng-Ta Chiang, "Design of CMOS Monolithic Digitized Light Transducer With Calibration Technique for Ambient Light Sensor Applications // IEEE. Sensors Journal. May. 2013. Vol.13, no.5. P.1931–1940.
10. Калачев А. В. Свето- цвето- температурная идентификация включена. Семейство датчиков оптического излучения MAX4400x // Новости электроники. 2012. № 8. С. 22–26.

УДК 621.314.228.4

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ SiGe СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ

А. С. Сальников, А. А. Коколов, Ф. И. Шеерман,
Р. Ю. Мусенов, И. М. Добуш, Л. И. Бабак

*Томский университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),
г. Томск, Россия*

Аннотация – Представлены результаты разработки интегральных симметрирующих трансформаторов (СТ), предназначенных для использования в монолитных интегральных схемах и системах на кристалле, выполненных на основе SiGe БиКМОП технологии. Результаты электромагнитного моделирования показывают, что разработанный СТ имеет довольно низкий уровень вносимых потерь и хорошее согласование. Правильность проектирования косвенно подтверждается работоспособностью смесителя, в состав которого входит трансформатор.

Ключевые слова: интегральный симметрирующий трансформатор, SiGe БиКМОП технология, электромагнитное моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

При проектировании современных радиоэлектронных устройств необходимо добиваться высоких технических параметров, одновременно принимая во внимание экономичность разрабатываемого решения. Широкая частотная полоса позволяет расширить круг потенциальных применений разрабатываемых устройств. Целый

набор беспроводных протоколов работает в диапазоне частот 1–4.5 ГГц. Таким образом, задача разработки универсальных широкополосных радиоэлектронных устройств (РЭУ) и систем, работающих в нескольких частотных диапазонах, является актуальной.

Чаще всего для СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) выбирают технологию GaAs рНЕМТ. Эта технология позволяет одновременно получить более высокий коэффициент усиления, большую выходную мощность и меньший коэффициент шума СВЧ устройств в сравнении с технологиями на основе кремния. Однако последние достижения привели к созданию СВЧ МИС на основе кремниевых КМОП и SiGe БиКМОП технологий с параметрами, сравнимыми с GaAs схемами. Вместе с тем кремниевые СВЧ МИС имеют существенные преимущества перед GaAs схемами, такие как низкая стоимость, меньшие массогабаритные параметры, простота интеграции с цифровой частью в одном кристалле при создании радиоэлектронных систем типа «система на кристалле».

Смесители являются основным устройством, выполняющим преобразование частоты в радиотехнических системах [1]. Широкое распространение получили двойные балансные смесители, поскольку они позволяют эффективно развязать сигналы промежуточной частоты, радиочастоты и гетеродина, подавляют четные гармонические составляющие в спектре выходного сигнала, а также повышают линейность системы. Как правило, входы двойного балансного смесителя дифференциальные. Поэтому необходимо использовать симметрирующие трансформаторы (СТ) для преобразования несимметричных сигналов ПЧ и РЧ в дифференциальные. Размещение интегральных СТ на одном кристалле со смесителем упрощает дальнейший монтаж в корпус и применение МИС смесителя, а также повышает интеграцию РЭУ типа «система на кристалле».

II. ПАРАМЕТРЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

СТ является шестиполюсником, при этом на входе сигнал несимметричный, а два его выхода используются для передачи симметричного сигнала. Таким образом, идеальный СТ имеет коэффициент передачи -3 дБ по амплитуде для каждого из выходных портов (т.е. сигнал делится между ними поровну) и разность фаз выходных сигналов 180 градусов во всей полосе частот. СТ также может являться частью других устройств, таких как направленный мост [2]. На практике характеристики СТ имеют частотную зависимость, и преобразование осуществляется в некотором диапазоне частот. Основными характеристиками СТ [3] являются амплитудный (Δ) и фазовый (θ) разбаланс, а также вносимые потери (IL), которые могут быть найдены из S -параметров трансформатора:

$$\Delta = 20 \log \left(\left| \frac{S_{21}}{S_{31}} \right| \right), \quad (1)$$

$$\theta = 180^\circ - |\varphi(S_{21}) - \varphi(S_{31})|, \quad (2)$$

$$IL = -10 \log (|S_{21}|^2 + |S_{31}|^2). \quad (3)$$

В интегральном исполнении трансформаторы могут быть изготовлены в виде двух спиральных катушек индуктивности, обладающих взаимной индукцией. Существует два основных варианта исполнения интегральных СТ (рис. 1) – на основе катушек с боковой связью (M1 и M2 – первый и второй слой металлизации) [4]. Кроме того, трансформатор можно изготовить с помощью связанных линий на основе делителя Маршанда [4, 5].

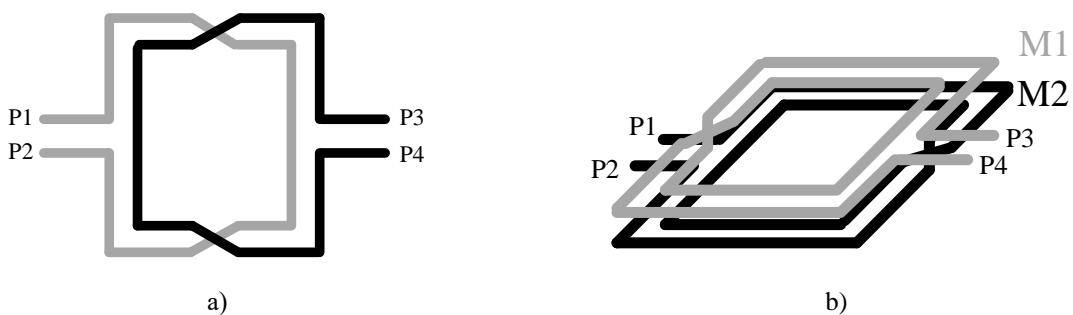


Рис. 1. Структура интегральных трансформаторов:
а) – трансформатор с боковой связью; б) – трансформатор с лицевой связью

III. РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТ

В ходе выполнения работы было проведено проектирование СТ в интегральном исполнении для полосы частот 1–4.5 ГГц. Для расчёта характеристик СТ использовалась программа Sonnet Lite [6], позволяющая проводить электромагнитное (ЭМ) моделирование с использованием метода моментов. Выбранная для проектирования кремниевая технология обеспечивает большую гибкость при проектировании СТ, поскольку имеет несколько слоёв металлизации [7].

Было исследовано несколько вариантов реализации СТ. Вариант №1 представляет собой катушки индуктивности восьмиугольной формы с лицевой связью. В этом варианте две идентичные катушки расположены друг под другом в разных слоях металлизации. Для их согласования может использоваться методика [4]. Вариант № 2 представляет собой связанные катушки индуктивности прямоугольной формы с лицевой связью. При этом катушки индуктивности имеют разное количество витков и, таким образом, осуществляют преобразование импеданса. Вариант № 3 представляет собой делитель Маршанда. Вариант № 4 представляет собой две катушки восьмиугольной формы, вложенные друг в друга. Таким образом, в этом варианте между катушками действует боковая связь. Характеристики СТ различных разработанных конструкций были определены с помощью ЭМ моделирования. В табл. 1 приведены основные параметры разработанных СТ в полосе частот 1–4.5 ГГц, рассчитанные по формулам (1)–(3).

ТАБЛИЦА 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННЫХ СТ В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ 1–4.5 ГГц

№ вар.	Δ , дБ	Θ , град	IL , дБ	Размер, мкм
1	<0.07	<0.5	1.7-3	392x392
2	<0.06	<2.4	0.6-1.0	530x520
3	0.6-0.95	<15	1.9-3.2	1905x828
4	<0.11	<0.45	1.1-3.5	1000x1000

Полученные варианты конструкции СТ имеют близкие значения характеристик, но разные габариты. По совокупности характеристик для использования в смесителе был выбран вариант №2. Рассмотрим этот вариант СТ более подробно.

Предполагается, что каждый выход СТ нагружен несимметричную нагрузку

50 Ом. Поскольку два из этих выходов являются симметричными, необходимый коэффициент трансформации составляет $1:\sqrt{2}$. Индуктивность первичной и вторичной катушек выбиралась так, чтобы их отношение было близко к этому значению. Поэтому катушки имеют разное количество витков – пять и шесть соответственно. Катушки расположены строго друг под другом. Для изготовления предлагаемой конструкции потребуется 4 слоя металлизации (с учётом необходимых переходов). Выбранная для реализации 0.25 мкм SiGe БиКМОП технология позволяет использовать до пяти слоёв металлизации, что достаточно для изготовления. Разработанная конструкция СТ приведена на рис. 2.

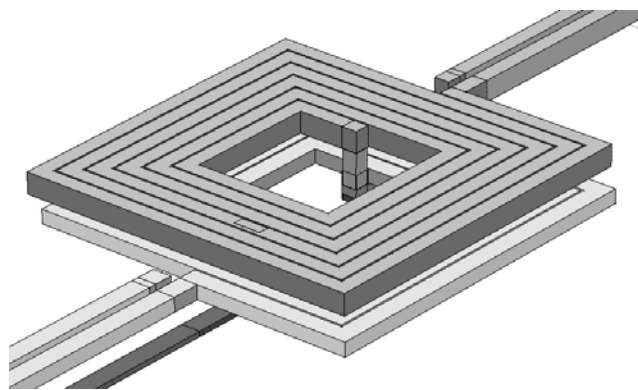


Рис. 2. Трёхмерное изображение разработанного СТ

На рис. 3 представлены результаты моделирования выбранного для реализации варианта № 2 СТ. Показаны коэффициенты передачи сигнала в правое и левое плечо симметричного выхода S21 и S31, коэффициенты отражения от каждого из выводов, а также амплитудный и фазовый разбаланс.

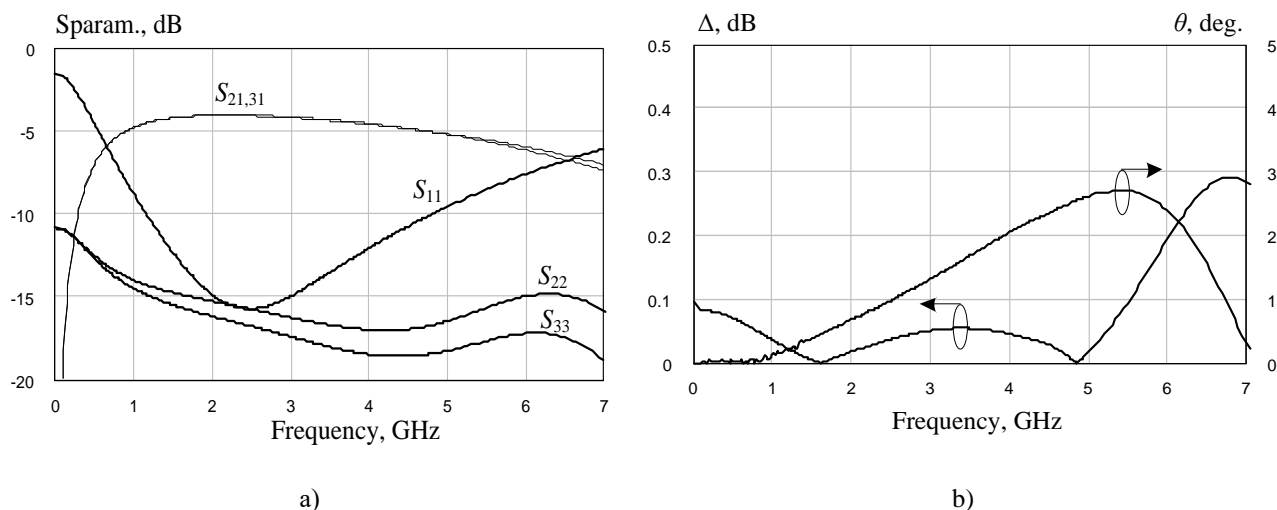


Рис. 3. Результаты моделирования выбранного варианта СТ

Согласно результатам моделирования, разработанный трансформатор имеет удовлетворительные характеристики и может быть использован для преобразования сигналов в разрабатываемых широкополосных СВЧ системах на кристалле.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представлены результаты разработки СТ для интегрального исполнения на основе SiGe БиКМОП технологии. Основное назначение интегральных СТ – РЭУ типа «система на кристалле». На основе сравнения по комплексу параметров была выбрана одна из разработанных конструкций. СТ был интегрирован в разработанный в ТУСУРе смеситель диапазона 1-4.5 ГГц. На момент подготовки статьи ещё не проведены экспериментальные исследования тестовых структур, однако выполнены измерения смесителя с интегрированным СТ. Эксперимент показал работоспособность смесителя, что служит косвенным подтверждением корректности разработки.

Работа выполнялась при финансовой поддержке прикладных научных исследований Министерства образования и науки РФ. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57715X0179.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хохол Д. С., Дмитриченко Е. В., Баров А. А. GaAs МИС широкополосного двойного балансного смесителя // Научная сессия ТУСУР-2011: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. Томск, 2011. Ч. 2. С. 256–259.
2. Михеев Ф. А., Гошин Г. Г., Фатеев А. В., Ройтман М. С. Сверхширокополосный направленный мост для векторного анализатора цепей диапазона СВЧ // Доклады ТУСУР. 2011. № 2 (24). С. 219–222.
3. Li R. C. RF circuit design. Hoboken: Wiley. 860 с.
4. Frye R. C. [et al]. A monolithic, compact balun matching network for SiP applications // Electrical Performance of Electronic Packaging. IEEE. 2004. С. 37–40.
5. Арыков В. С., Баров А. А., Кондратенко А. В., Фоминых А. А., Хохол Д. С. Монолитные интегральные схемы пассивных удвоителей частоты S- и C-диапазонов на основе GaAs pHEMT-технологии // Электронные средства и системы управления: материалы докл. 7-й Междунар. конф. 2011. С. 49–53.
6. Официальный сайт компании Sonnet Software. URL: <http://www.sonnetsoftware.com> (дата обращения: 03.02.2015).
7. Burghartz J. N., Rejaei B. On the design of RF spiral inductors on silicon // Transactions on Electron Devices. IEEE. 2003. Vol. 50, no. 3. P. 718–729.

УДК 004.94

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА В ТЕРРИТОРИАЛЬНО УДАЛЕННОМ ФИЛИАЛЕ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В. В. Соседко, А. Г. Янишевская

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Выпуск продукции на приборостроительном предприятии подразумевает наличие отлаженных работающих механизмов на каждой стадии жизненного цикла изделия, начиная с проектирования документации на изделие и заканчивая его утилизацией. Работа территориально удаленного филиала отличается от головного развитого предприятия первоначальным отсутствием оборудования, освоенной технологии и лицензионных CAD/CAM/CAE-систем.

Задачей данной статьи является разработка математической модели системы конструкторско-технологической подготовки и производства в филиале приборостроительного предприятия, а также статистическая обработка предполагаемых результатов внедрения разработанной математической модели в филиале и демонстрация ее преимуществ при внедрении на данном предприятии.

Математическая модель системы КТПП в филиале строится на базе постулатов теории вероятности, в частности, теории массового обслуживания и математической статистики.

При создании модели потока данных о движении информации, заказов, деталей и узлов в филиале предприятия были классифицированы группы подразделений. Исходя из анализа деятельности подразделений, потока данных, деталей и документов был построен граф состояний системы конструкторско-технологической подготовки и производства, были описаны переходы и присвоены коэффициенты. Каждому состоянию системы построенного графа состояний были определены соответствующие предельные вероятности состояний, а также составлены уравнения Колмогорова. При выполнении интегрирования систем уравнений Колмогорова определяется вероятность состояний деятельности указанных подразделений и производства как функции времени в каждый момент времени.

На основании разработанных математической модели единой системы конструкторско-технологической подготовки производства и графа состояний авторами была проведена статистическая обработка результатов внедрения математической модели, а также показано ее преимущество при внедрении на данном предприятии. Были проведены исследования по изучению вероятности загрузки служб филиала и сторонних исполнителей (заказами, полученными от филиала в течение месяца).

Исходя из результатов проведенных исследований, становится очевидно, что внедрение разработанной математической модели КТПП в производстве позволяет в целом увеличить загрузку служб, что повышает ритмичность их работы и, как следствие, производительность труда.

Разработанная математическая модель системы конструкторско-технологической подготовки и производства может быть применена для определения вероятности состояний деятельности подразделений и производства как функции времени в каждый момент времени, что позволит вести учет загрузки выполнения работ в филиалах предприятия.

Ключевые слова: модель, граф состояний, коэффициент, уравнение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Выпуск продукции на приборостроительном предприятии подразумевает наличие отлаженных работающих механизмов на каждой стадии жизненного цикла изделия: начиная с проектирования документации на изделие (в зависимости от рода выполняемой работы – эскизный проект, технический проект, разработка рабочей конструкторской документации, далее РКД) [1] и заканчивая его утилизацией. В части разработки и подготовки производства изделий речь идет о наличии единой системы конструкторско-технологической подготовки и производства (КТПП). Она охватывает процессы проектирования, конструкторской подготовки, технологической проработки, подготовки документации (конструкторской, технологической, программной), необходимой для производства.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Работа территориально удаленного филиала, находящегося в другом городе, осуществляется посредством подключения к информационным ресурсам и базам данных головного предприятия через защищенный интернет-канал. При этом лицензии на работу в программном обеспечении, начиная с операционной системы, офис-

ных программ и заканчивая САПР, берутся также по сети Интернет. Также следует пояснить, что филиал находится под управлением головного предприятия и деятельность (филиала) выполняется исходя из требований, регламентов и инструкций головного предприятия. Филиал выполняет разработку КД и изготовление опытного образца изделия с последующим мелкосерийным и серийным производством. В связи с этим технологическая подготовка производства уходит на второй план, однако в перспективе при развертывании собственной производственной базы данные работы будут выполняться (исходя из технологической оснащённости филиала и оптимизации производства). При этом принимается решение о том, какое производство целесообразно развивать, а какие работы экономически невыгодно выполнять своими силами и поэтому они будут выполняться сторонними организациями.

Разработка КД ведется в САПР Компас и P-CAD. На необходимые для применения элементы (стандартные изделия, материалы, прочие изделия, электрорадиоэлементы) оформляются заявки на ввод в базы данных и справочники, и запускаются бизнес-процессы в системе Лоцман.

В общем случае схема процессов конструкторской подготовки приборостроительного производства имеет вид, представленный на рис. 1, а схема процессов конструкторско-технологической подготовки производства – на рис. 2. В филиале предприятия в условиях первоначального отсутствия оборудования, освоенной технологии и лицензионных CAD/CAM/CAE-систем [2] схема процессов конструкторской подготовки представлена на рис. 3.

Принцип действия по схеме процессов состоит в параллельной работе с электронной и механической частями изделия соответствующими коллективами (группами) в процессе конструкторской и технологической подготовки. Работа выполняется в PDM-системе с массивом единых баз данных (БД) электрорадиоэлементов (для САПР [3, 4], их математических, тепловых и 3D-моделей) и корпоративных справочников (информационно-справочная система, стандартных изделий, материалов и сортов) и классификатора ЕСКД).

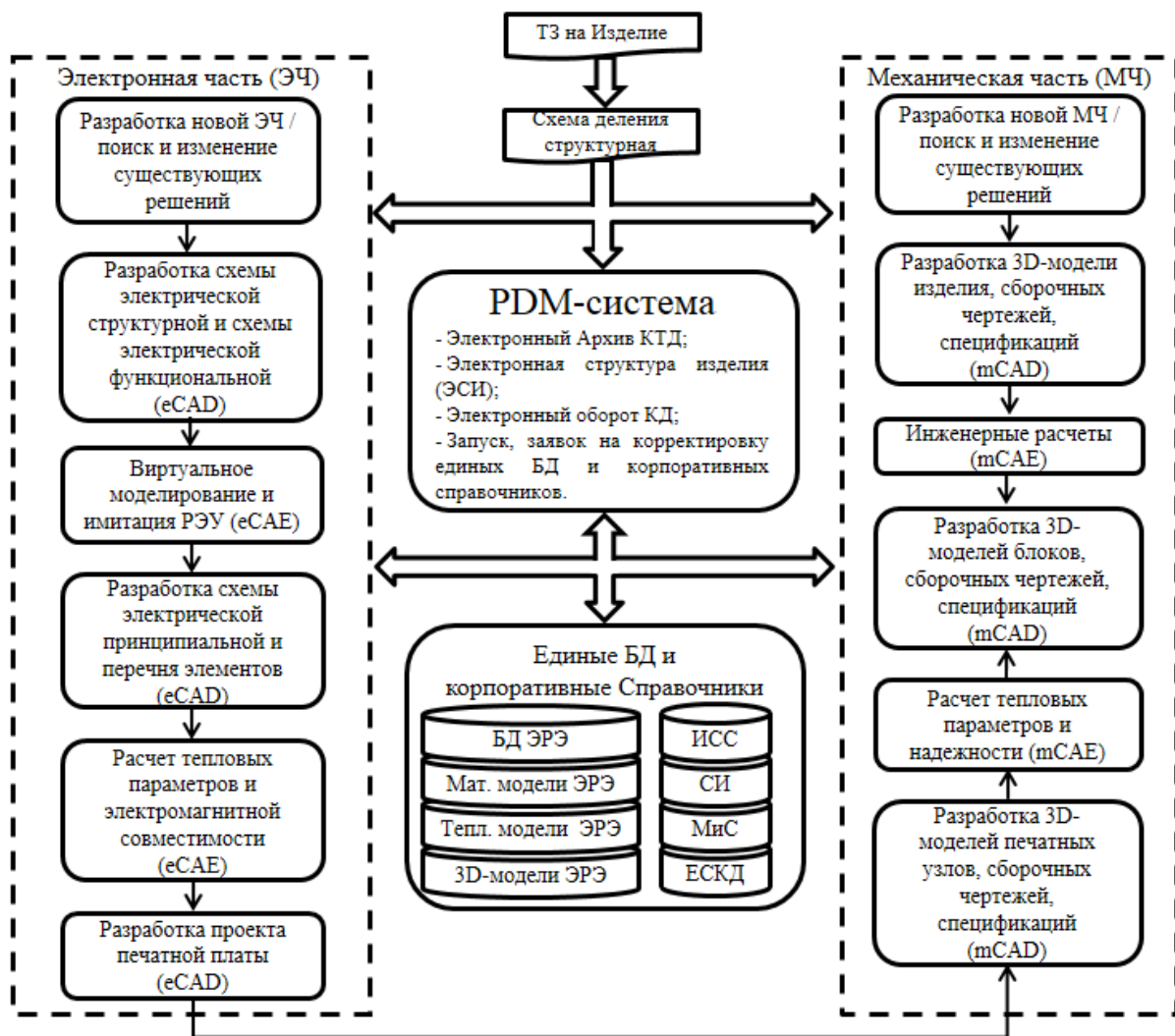


Рис. 1. Схема процессов конструкторской подготовки

В целом, процесс разработки КД и изготовления опытного образца пошагово следующий:

1. Разработка КД (ряд операций, включающих в себя разработку структуры, ЭСИ, подготовку, согласование заявок на ввод новых элементов в БД, разработку КД с применением вновь введенных элементов, согласование КД – технологический контроль, нормоконтроль, согласование с заказчиком), сдача КД в архив (электронный).
2. Приобретение ПКИ, материалов.
3. Изготовление печатных плат (этап выполняется сторонним исполнителем).
4. Изготовление деталей на станках с ЧПУ по 3D-модели и чертежу (этап выполняется сторонним исполнителем).
5. Нанесение гальванического покрытия на детали, покраска, нанесение гравировки/надписей (этап выполняется сторонним исполнителем).
6. Монтаж печатных узлов.
7. Сборка модулей/узлов/блоков.
8. Запуск и настройка модулей/узлов/блоков.
9. Сборка изделия.
10. Запуск и настройка изделия.
11. Проведение испытаний с корректировкой КД, присвоением соответствующей литеры и сдачей: КД – в архив, а изделия – заказчику.

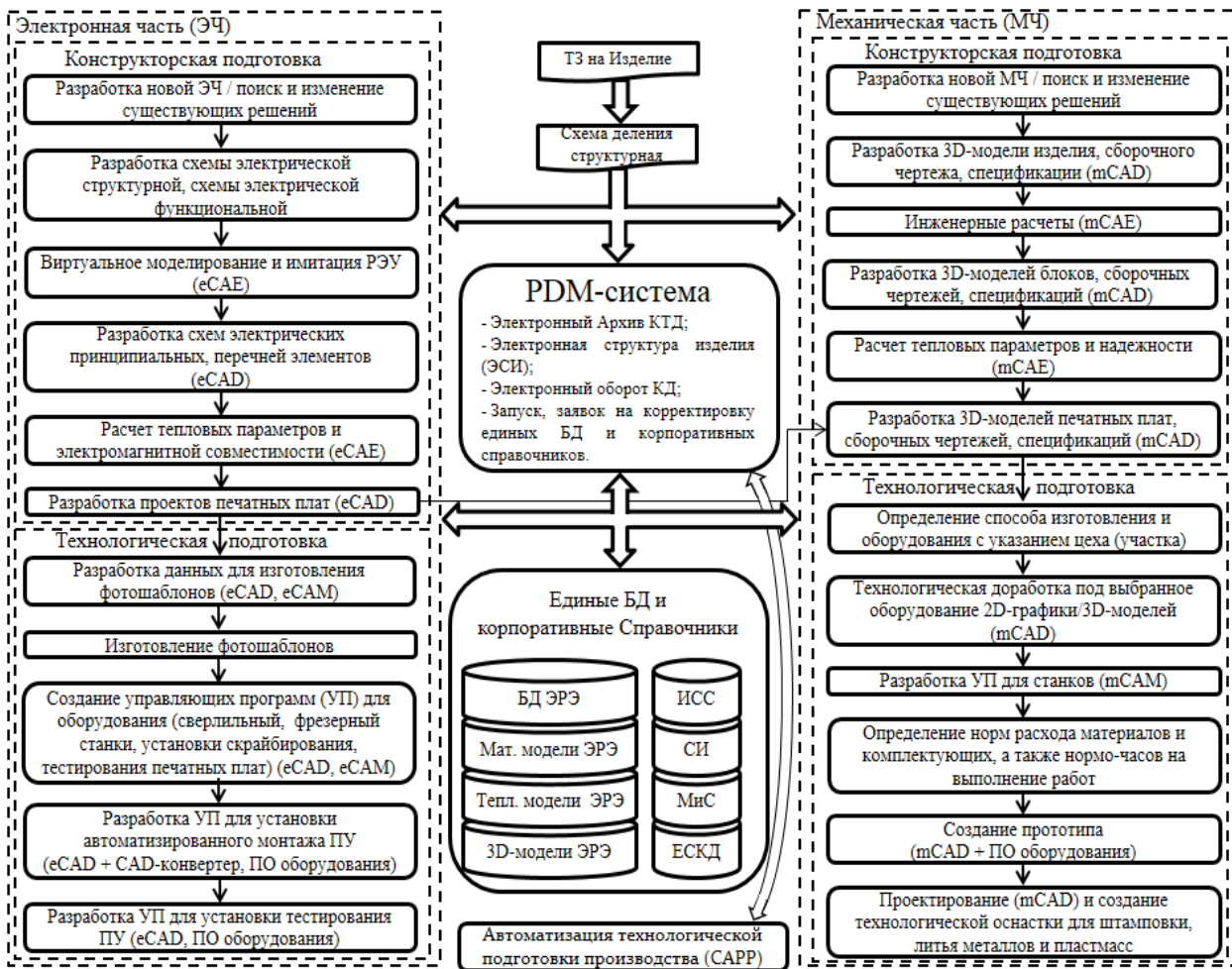


Рис. 2. Схема процессов конструкторско-технологической подготовки производства

Задачей данной статьи является разработка математической модели системы конструкторско-технологической подготовки и производства в филиале приборостроительного предприятия, а также статистическая обработка предполагаемых результатов внедрения разработанной математической модели в филиале, и демонстрация ее преимуществ при внедрении на данном предприятии.

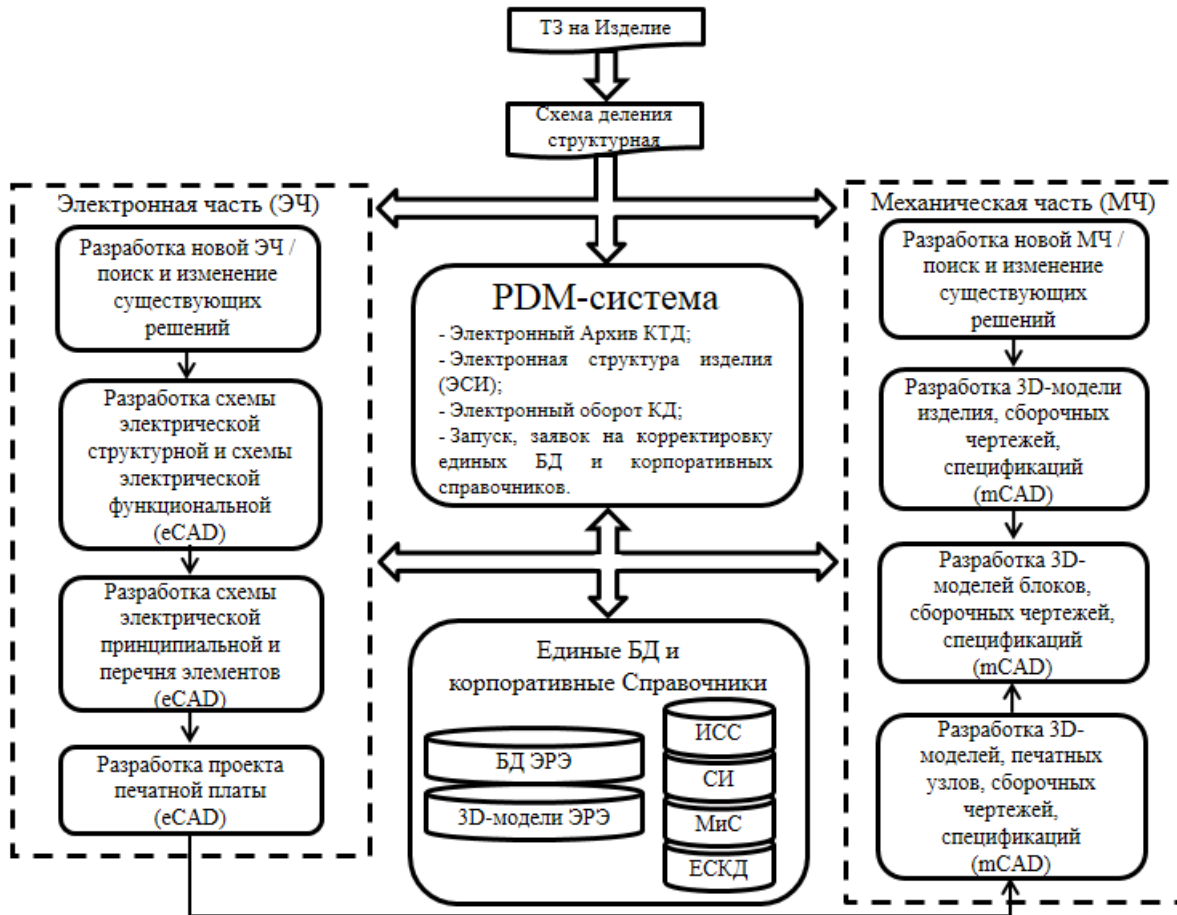


Рис. 3. Схема процессов конструкторской подготовки в филиале

III. ТЕОРИЯ

Математическая модель системы КТПП в филиале строится на базе постулатов теории вероятности, в частности, теории массового обслуживания и математической статистики [5].

Большое число видов производственной деятельности на предприятии, подвергшихся анализу при выборе оптимального решения, протекает как случайные процессы.

Для определения количественных параметров, характеризующих степень эффективности в процессе принятия решений при конструкторско-технологической подготовке производства и управлении производством, необходимо разработать вероятностную модель процессов, учитывающую случайные факторы, сопровождающие данные процессы.

С целью математического описания конструкторско-технологической подготовки производства, а также автоматизации управления производством, развивающихся обычно в форме случайных процессов, применен математический аппарат, из теории вероятности для так называемых марковских случайных процессов.

Случайный процесс, который протекает в системе S , считается марковским, если он протекает без последействия. В этом процессе будущее состояние не зависит от прошлого, а прошлое состояние не влияет на будущее [6].

При исследовании случайных процессов, имеющих дискретные состояния, возникающих во время конструкторско-технологической подготовки производства и в управлении производством, воспользуемся геометрической схемой – графом состояний. Данный вид схемы описывает потоки информации в процессе управления сложным производством, а случайная последовательность событий в нем будет марковской цепью. С помощью размеченного графа состояний можно определить вероятности состояний

$$p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$$

как функции времени. Данные вероятности удовлетворяют уравнениям Колмогорова. В этих дифференциальных уравнениях неизвестными функциями будут вероятности состояний. Следовательно, решив данные уравнения, можно вычислить вероятности состояний производства как функции времени.

Поток информации о ходе КТПП и управления производством на предприятии, может осуществляться в виде документов и сообщений в PDM-систему. Такой поток информации о ходе разработки изделия или о состоянии производства, как правило, будет регулярным.

В идеальном случае поток информации стационарный, без последствия и ординарный. Для данного простейшего потока среднее число событий в единицу времени будет потоком интенсивности λ , будет величиной постоянной: $\lambda = const$.

Поток, который образован каждым $n - m$ событием простейшего потока, - поток Эрланга порядка n . Обобщенный закон распределения Эрланга $(n - 1)$ -го порядка ($(n - 1)$ -го цеха) будет иметь плотность в виде выражения:

$$g_{n-1}(x) = \begin{cases} (-1)^{n-1} \cdot \prod_{i=1}^n \lambda_i \sum_{j=1}^n \frac{e^{-\lambda_j x}}{\prod_{k \neq j} (\lambda_j - \lambda_k)} & \text{при } x > 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

где $k = 1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, n$, кроме $\lambda_j - \lambda_j$.

Таким образом, применение закона распределения Эрланга даст возможность вычислить усредненную величину потока информации каждого подразделения, найти плотность потока по предприятию в целом и оценить переход между состояниями служб и производства в целом.

Поток информации, деталей и узлов по маршрутной технологии отражен в первичных документах (конструкторская документация, заказы, заявки, накладные, счета-фактуры, акты выполнения работ и т.д.), сопровождающих перевод производства из состояния в состояние в реальном масштабе времени. В данных документах фиксируется изменение состояния производства с ежесуточной периодичностью. Сдача готовых печатных плат, деталей и сборочных единиц осуществляется, как правило, по маршрутным листам. На местах приема и сдачи печатных плат, деталей, узлов в головном предприятии выполняется запрос данных с созданием маршрутного листа, содержащего штрих-код, хранящий базовую информацию о детали – ее наименование, материал из которого она сделана, партия, сроки сдачи, технологический маршрут. Маршрутный лист на печатные платы, детали и узлы примем за единицу плотности потока событий λ , который переводит службы из состояния X_i в состояние X_j .

По окончании рабочего дня из каждого подразделения в систему поступают уведомления для их последующей обработки, учета и планирования производства. После решения задач по оперативному управлению производством и выдачи планов-графиков подразделениям они переходят в очередное состояние.

Направление потоков документов между подразделениями, а также от подразделений в систему и обратно предлагается выстроить в соответствии с маршрутной технологией деталей и сборочных единиц.

Исходя из маршрутных технологий при организации производства на приборостроительном предприятии для достижения эффективных результатов в управлении было решено группировать подразделения, основываясь на родственных специальностях в одной группе передела.

Размеченный граф изменения состояний конструкторско-технологической подготовки производства и производства, с дискретностью 24 часа (сутки) изображен на рис. 4. Данный граф состояний затрагивает все основные уровни структуры предприятия – конструкторские и технологические отделы, заготовительные и сборочные цеха, склад готовой продукции. В соответствии с маршрутными технологиями предлагается классификация групп подразделений, сложившаяся на предприятиях.

На сегодняшний день в филиале пока не внедрена технология оборота маршрутных листов, инженерный корпус представлен одним конструкторско-технологическим отделом, заготовительные цеха – сторонними исполнителями, а сборочные цеха – одним сборочным участком. В связи с этим предложенная классификация групп для филиала изображена на рис. 5.

1. Конструкторско-технологический отдел (КТО). Осуществляет конструкторскую подготовку изделий. Также выполняет технологическую проработку изделий, но в силу особенностей филиала данная деятельность пока не выполняется.

2. Сторонние исполнители. Данные организации изготавливают печатные платы (ПП), детали (мех), выполняют гальвано-малярные работы.

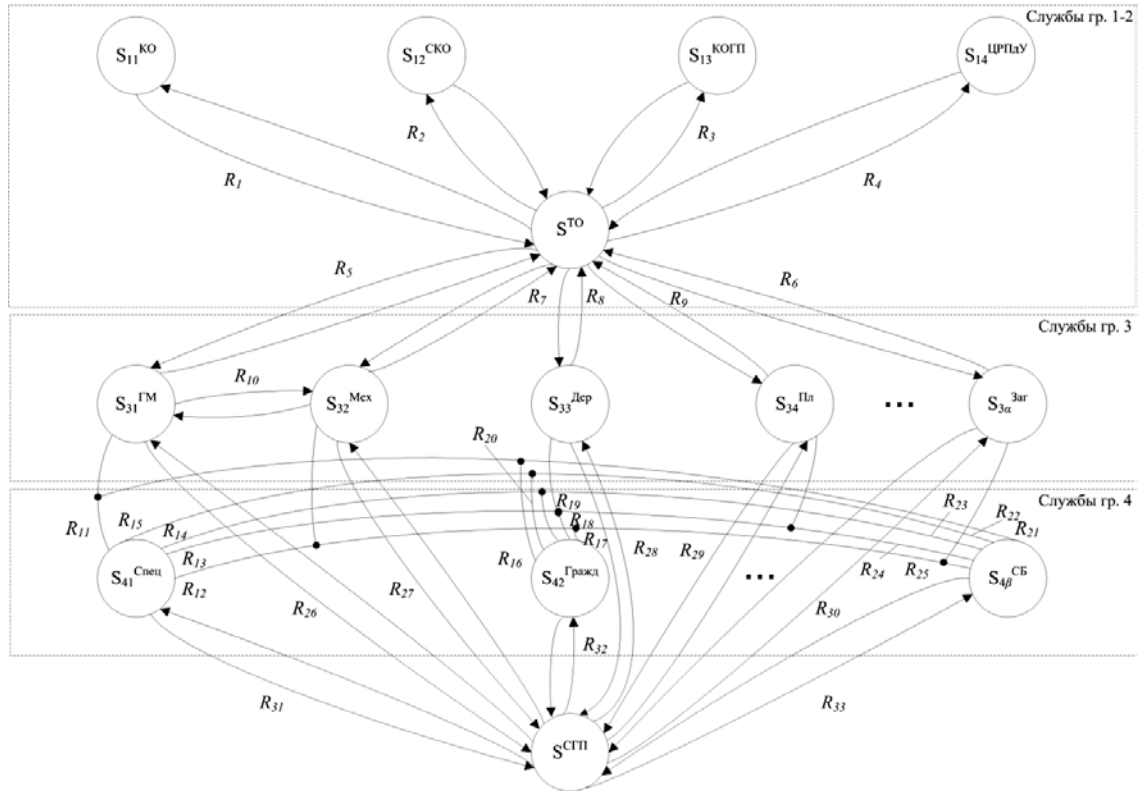
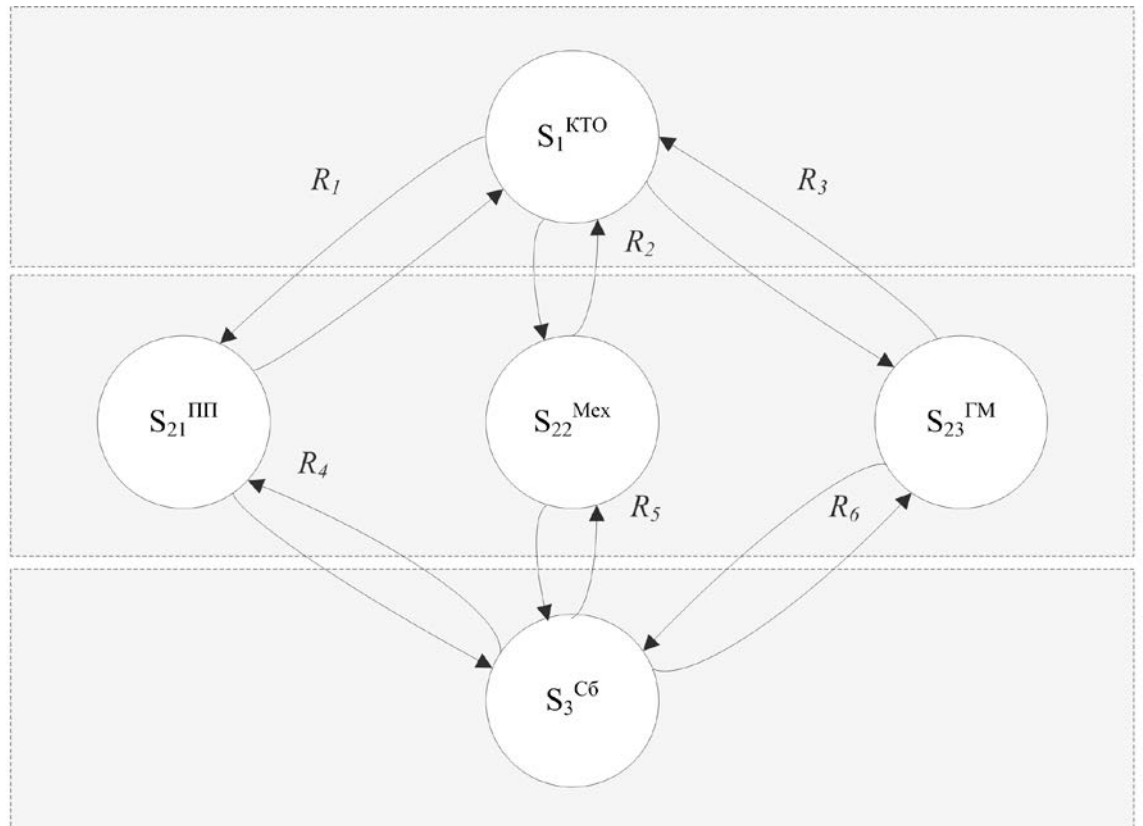


Рис. 4. Размеченный граф состояний конструкторской подготовки производства и производства головного предприятия



$$R_1 \langle = \rangle \begin{cases} z_{1,21} \lambda \\ z_{21,1} \mu \end{cases}; R_2 \langle = \rangle \begin{cases} z_{1,22} \lambda \\ z_{22,1} \mu \end{cases}; R_3 \langle = \rangle \begin{cases} z_{1,23} \lambda \\ z_{23,1} \mu \end{cases}; R_4 \langle = \rangle \begin{cases} m_{21,3} \lambda \\ m_{3,21} \mu \end{cases}; R_5 \langle = \rangle \begin{cases} m_{22,3} \lambda \\ m_{3,22} \mu \end{cases}; R_6 \langle = \rangle \begin{cases} m_{23,3} \lambda \\ m_{3,23} \mu \end{cases}$$

Рис. 5. Размеченный граф состояний конструкторской подготовки производства и производства филиала с описанием переходов

И хотя указанные исполнители являются сторонними организациями, всё же в случае с графом можно допустить их рассмотрение в качестве цехов, однако переходы между ними и потоки данных будут в виде заказов, заключения договоров, выполнения работ, оплаты услуг с подтверждением соответствующими документами.

3. Сборочный участок. На данном участке выполняются монтаж узлов и блоков, сборка, запуск, регулировка, испытания и сдача блоков и изделий.

Первичные информация и документы, сопровождающие поток готовых деталей и сборочных единиц по филиалу, образуют потоки информации, переводящие состояние проектирования, заказов и монтажно-сборочных работ с одного уровня на другой (из одного статуса в другой).

При принятии среднего числа событий, отраженных в одном типовом первичном документе или партии деталей или узлов (с сопровождающим их соответствующим документом – маршрутным листом), за λ , полный поток документов, попадающих в систему для их последующей обработки, определяется зависимостью $x \cdot \lambda$, где x принимает значения z , m в графе состояний (см. рис. 5). В нашем случае λ – величина постоянная ($\lambda = const$), таким образом, речь идет о простейшем потоке.

При этом:

z – заказы на выполнение работ сторонними исполнителями;

m – первичные документы, сопровождающие детали, узлы, блоки и изделия на каждом этапе производства – маршрутные листы;

В процессе конструкторско-технологической подготовки производства и производства между подразделениями запускаются заказы на выполнение работ, проводится согласование документов, а также предусмотрены услуги кооперации по доработке деталей. При этом документы-заказы возвращаются на доработку или уточнение или переходят на следующий этап, а детали после выполнения заказов возвращаются назад. Детали идут в комплекте с маршрутными листами, а в систему приходят соответствующие уведомления, при этом образуя плотность «потока обслуживания» μ – поток, постоянно обслуживающий заявки, приходящие из других цехов. Результирующий общий поток таких документов можно выразить зависимостью $x \cdot \mu$.

Проведенный на приборостроительном предприятии анализ потоков первичных документов, идущих с потоками деталей и узлов, а также сообщений, приходящих в систему после обработки документов, показывает, что полученный размеченный граф состояний отображает многоканальную СМО.

Для каждого из получившихся пяти состояний системы S графа найдем предельные вероятности состояний и составим уравнения Колмогорова:

$$S_1 : \frac{dp_1}{dt} = -z_{1,21}\lambda p_1 + z_{21,1}\mu p_{21} - z_{1,22}\lambda p_1 + z_{22,1}\mu p_{22} - z_{1,23}\lambda p_1 + z_{23,1}\mu p_{23} \quad (2)$$

$$S_{21} : \frac{dp_{21}}{dt} = z_{1,21}\lambda p_1 - z_{21,1}\mu p_{21} - m_{21,3}\lambda p_{21} + m_{3,21}\mu p_3 \quad (3)$$

$$S_{22} : \frac{dp_{22}}{dt} = z_{1,22}\lambda p_1 - z_{22,1}\mu p_{22} - m_{22,3}\lambda p_{22} + m_{3,22}\mu p_3 \quad (4)$$

$$S_{23} : \frac{dp_{23}}{dt} = z_{1,23}\lambda p_1 - z_{23,1}\mu p_{23} - m_{23,3}\lambda p_{23} + m_{3,23}\mu p_3 \quad (5)$$

$$S_3 : \frac{dp_3}{dt} = m_{21,3}\lambda p_{21} - m_{3,21}\mu p_2 + m_{22,3}\lambda p_{22} - m_{3,22}\mu p_3 + m_{23,3}\lambda p_{23} - m_{3,23}\mu p_3 \quad (6)$$

Для каждого передела (конструкторско-технологическая подготовка, сторонние исполнители и сборочный участок) составим системы уравнений Колмогорова.

Состояние конструкторско-технологической подготовки:

$$\frac{dp_1}{dt} = (z_{21,1}p_{21} + z_{22,1}p_{22} + z_{23,1}p_{23})\mu - (z_{1,21} + z_{1,22} + z_{1,23})\lambda p_1 \quad (7)$$

Состояние заготовительного производства – сторонних исполнителей:

$$\begin{cases} \frac{dp_{21}}{dt} = (z_{1,21}p_1 - m_{21,3}p_{21})\lambda + (m_{3,21}p_3 - z_{21,1}p_{21})\mu \\ \frac{dp_{22}}{dt} = (z_{1,22}p_1 - m_{22,3}p_{22})\lambda + (m_{3,22}p_3 - z_{22,1}p_{22})\mu \\ \frac{dp_{23}}{dt} = (z_{1,23}p_1 - m_{23,3}p_{23})\lambda + (m_{3,23}p_3 - z_{23,1}p_{23})\mu \end{cases} \quad (8)$$

Состояние сборочного участка:

$$\frac{dp_3}{dt} = (m_{21,3}p_{21} + m_{22,3}p_{22} + m_{23,3}p_{23})\lambda - (m_{3,21} + m_{3,22} + m_{3,23})\mu p_3 \quad (9)$$

Интегрирование полученных систем уравнений дает возможность определить вероятности состояний конструкторско-технологической подготовки и производства как функции времени в каждый момент времени [4].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На основе мониторинга деятельности подразделений, задействованных в производственных процессах, авторами были исследованы загрузка и ритмичность работы служб филиала в процессе изготовления типового изделия. Экспериментальным путем были вычислены коэффициенты в соответствии с переходами графа состояний конструкторско-технологической подготовки производства и производства. Для усреднения показателей базовыми предприятиями приняты начало, середина и конец месяца. Результаты исследований приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

ЗАГРУЗКА И РИТМИЧНОСТЬ РАБОТЫ СЛУЖБ ФИЛИАЛА В ТЕЧЕНИЕ МЕСЯЦА

№ п/п	Переходы	Коэффициенты	Показатели в течение месяца		
			Начало месяца	Середина месяца	Конец месяца
1	R ₁	z _{1,21}	10	8	10
2		z _{21,1}	1	1	1
3	R ₂	z _{1,22}	12	9	12
4		z _{22,1}	1	1	1
5	R ₃	z _{1,23}	1	12	9
6		z _{23,1}	1	1	1
7	R ₄	m _{21,3}	1	10	8
8		m _{3,21}	1	1	1
9	R ₅	m _{22,3}	1	12	9
10		m _{3,22}	1	1	1
11	R ₆	m _{23,3}	1	1	1
12		m _{3,23}	1	12	9
13		λ	26	52	49
14		μ	6	17	14

Используя полученные коэффициенты в системах уравнений (7–9) с учетом того, что при постоянных вероятностях их производные равны 0, а также применяя нормировочное условие (10):

$$p_1 + p_{21} + p_{22} + p_{23} + p_3 = 1 \quad (10)$$

были вычислены вероятности состояний системы для заданных этапов месяца. Результаты вычислений представлены в табл. 2.

В процессе анализа разработанной математической модели, а также применения изложенных методов и принципов, авторами было предложено внести существенные изменения в текущие бизнес-процессы конструкторско-технологической подготовки и производства предприятия. Данные изменения привели к большей прозрачности производственного процесса, заключающейся в оперативном появлении актуальной информации о ходе производственных процессов у начальников подразделений всех рангов и ответственных за состояние производства лиц, а также к сокращению времени и уменьшению вероятности ошибочной передачи информа-

ции, деталей и блоков. Это, в свою очередь, положительно повлияло на динамику выполнения производственного плана, а также на себестоимость изделий в целом, зависящую, в том числе, от дополнительных расходов, связанных с потерями времени и финансовых ресурсов на устранение последствий от неправильно или не вовремя принятых решений и действий персонала.

ТАБЛИЦА 2
ВЕРОЯТНОСТИ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ В ТЕЧЕНИЕ МЕСЯЦА

№ п/п	Группы	Вероятности состояний	Вероятности состояний системы в течение месяца		
			Начало месяца	Середина месяца	Конец месяца
1 1	КТО	p_1	0,0086	0,0084	0,0084
2	СИ	ПП	0,2202	0,0132	0,0208
3		Мех	0,0139	0,0122	0,0204
4		ГМ	0,0123	0,742	0,6536
5	СБ	p_3	0,745	0,2242	0,2968

На основании разработанной математической модели единой системы конструкторско-технологической подготовки производства и производства, и графа состояний авторами была проведена статистическая обработка результатов внедрения математической модели, а также показано ее преимущество при внедрении на данном предприятии.

Были проведены исследования по изучению вероятности загрузки служб филиала и сторонних исполнителей (заказами, полученными от филиала в течение месяца). Данные исследования приведены в табл. 2. Для наглядности они приведены в графике на рис. 6.

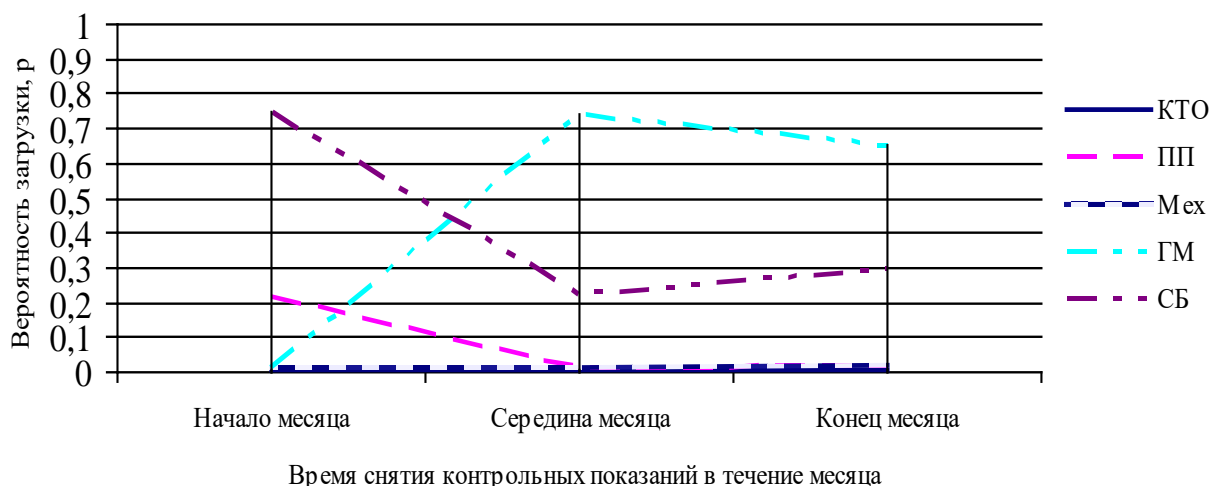


Рис. 6. График вероятности загрузки подразделений филиала в течение месяца

Таким образом, исходя из результатов проведенных исследований, становится очевидно, что внедрение разработанной математической модели КТПП и производства позволяет в целом увеличить загрузку служб, что повышает ритмичность их работы и, как следствие, производительность труда.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из данных исследования видно, что вероятность загрузки КТО в течение месяца находится практически на одном уровне (0.0086-0.0084). Вероятность загрузки стороннего исполнителя-изготовителя печатных плат (ПП) в течение месяца снижается в 10 раз (с 0.2202 до 0.0208), вероятность загрузки стороннего исполнителя-изготовителя деталей (Мех) с начала месяца (0.0139) к концу месяца увеличивается в 1.5 раза (до 0.0204). Вероятность загрузки стороннего исполнителя гальвано-малярных работ (ГМ) в течение месяца со значения 0.0123 сначала возрастает в 60 раз до 0.742, а затем уменьшается на 12.5 % до значения 0.6536, итого по отношению к началу месяца увеличивается в 53 раза. Из данных результатов можно сделать вывод, что для сторонних исполнителей привязка только к данному филиалу в качестве основного заказчика крайне не выгодна из-за рваного графика заказов, и поэтому они должны либо устанавливать высокие цены на свои услуги, либо иметь большой

портфель заказов от других организаций, что более приемлемо в условиях нестабильности рынка. Вероятность загрузки сборочного участка со значения 0.745 снижается к середине месяца до 0.2242, а к концу месяца – увеличивается до 0.2968.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель системы конструкторско-технологической подготовки и производства может быть применена для определения вероятности состояний деятельности подразделений и производства как функции времени в каждый момент времени, что позволит вести учет загрузки выполнения работ в филиалах предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2.103-68. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Стадии разработки.
2. Recent developments in computer-aided design and engineering // CAD International Directory. R.M. Sim.ScienceDirect. 1986. P.11–15. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780408255554500056>.
3. Modeling for printed-circuit board simulation. The practical engineer, Anil Balam. Oct 2.IEEE Spectrum. 2000. URL:<http://spectrum.ieee.org/semiconductors/design/modeling-for-printedcircuit-board-simulation>.
4. The Research and Application of the Integration Pattern of PDM and CAD in Aerosun. Qun Gao // Dept. of Ind. & Commercial Manage., Nanjing Inst. of Ind. Technol., Nanjing, China. Computer Science & Service System (CSSS), 2012. International Conference on. 2012. URL:<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6394276&newsearch=true&queryText=pdm>.
5. Соседко В. В., Янишевская А. Г. Математическая модель единой системы конструкторско-технологической подготовки и производства на промышленном предприятии // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1404>.
6. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.

УДК 004.732

ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

В. В. Соседко, А. Г. Янишевская
Омский государственный технический университет

Аннотация – Технологии беспроводной передачи данных и управления находят все более массовое применение. При этом задачи по управлению сложным в технологии производством, таким как изготовление печатных плат, сводятся к выстраиванию технологической цепочки производства (организации линий, участков, рабочих мест), выбору беспроводной технологии управления, а также аппаратной части. В статье авторами проведен обзор видов, стандартов беспроводной связи, основных компаний-разработчиков беспроводных решений. Выбрана технология беспроводного приема и передачи данных в области автоматизации производственных систем. Описан типовой технологический процесс изготовления печатных плат. Разработана упрощенная схема процесса изготовления печатных плат на основе сервера управления. Представлен перечень оборудования для производства печатных плат в пооперационном порядке. В результате проведенного исследования авторами разработана система управления производством печатных плат на основе беспроводной технологии, что позволяет существенно сэкономить на прокладке проводной сети, получив при этом скорость и надежность передачи данных, удовлетворяющих требованиям производства.

Ключевые слова: печатные платы, беспроводная связь, обмен данными.

I. ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные технологии, посредством которых осуществляются связь, сбор и передача данных, а также создание и развертывание сетей, всё больше используются в сфере автоматизации и управления производством. Прогресс и дальнейшее продвижение беспроводной связи, как и в случае с другими перспективными технологиями, происходит благодаря основному стремлению сэкономить, а также повысить эффективность производства и получить конкурентное преимущество. В связи с этим организации, внедряющие новые системы, рассчи-

тывают на значительное снижение расходов за счет отказа от затрат на материалы и услуги, связанные с организацией проводной сети

Маловероятно, что беспроводная связь полностью вытеснит традиционную проводную во всех сферах деятельности, однако можно рассчитывать на возникновение гибридных систем, в которых беспроводная связь будет являться дополнением к проводной. В данных системах такие характерные черты беспроводных технологий, как экономичность, удобство и эффективность, будут сочетаться наряду с надежностью и безопасностью традиционной технологии [1].

Можно выделить следующие сферы, где применяются беспроводные локальные сети:

- Организация доступа в местах большого скопления народа – аэропортах, медицинских учреждениях, железнодорожных и автовокзалах и т.д.

- Организация локальных беспроводных сетей в помещениях, лишенных возможности установки современной кабельной системы, таких как исторические здания с оригинальным интерьером.

- Развертывание временных локальных сетей на время проведения мероприятий.

- Организация альтернативного резидентного доступа в многоквартирных домах у операторов связи, не имеющих проводного доступа.

- Нарращивание инфраструктуры локальных сетей. В случае малого количества рабочих клиентских мест в здании процесс прокладки отдельной ветви сети становится невыгодным, уступая место более рациональному предложению – беспроводной связи.

- Организация мобильных локальных сетей, предлагающих пользователю возможность использовать сети, не ограничиваясь одним помещением или зданием [2].

Вместе с обеспечением деятельности в сфере связи, услуг и мультимедийной среды, применение беспроводных технологий возможно и для управления производством, в частности – изготовлением печатных плат.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основными задачами данной статьи ставились:

1. Проведение сравнительного обзора беспроводных технологий связи.
2. Формализация процесса изготовления печатных плат с целью организации управления данным производством посредством беспроводной сети.
3. Подбор оборудования для организации управления производством печатных плат с применением беспроводных технологий.

III. ТЕОРИЯ

1. Виды беспроводной связи

Всё большую популярность набирают распределенные интеллектуальные системы, способные выполнять обработку входных и выходных данных. Системы становятся всё более автономными, что сокращает объемы сетевых трафиков, удовлетворяя условиям применения беспроводной связи, являющейся более практичным средством передачи данных. Беспроводные технологии представлены большим числом разновидностей, сфер их применения и способов реализации в информационных и автоматизированных системах [3].

По аналогии с проводной связью у беспроводной имеется ряд протоколов и методов обмена сигналами. Данные методы берут начало из различных радиочастотных технологий, охватывая обычную радиосвязь и сотовую телефонию. В настоящее время добавились портативные и карманные компьютеры, планшеты и другие мобильные устройства. Все они подключаются к персональным сетям. Большая часть видов беспроводной связи, претендующих на выбор в сфере управления, базируются на давно известной технологии рассеянной передачи и цифровой коммутации пакетов. Рассеянной (шумоподобной) передачей является передача сигнала одновременно по большому числу каналов в границах выделенной полосы пропускания. Данный вид передачи позволяет устранить перекрестные помехи, помехи при приеме, и кроме этого устраняет перегрузку каналов. На приемном конце исходный сигнал восстанавливается из одинаковых шумоподобных частей. Также с помощью коммутации пакетов организуется более эффективная связь с более высокой скоростью передачи и большим объемом передаваемых данных. Некоторые из стандартов беспроводной связи установлены Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и находятся в сфере его ответственности, являясь частью семейства стандартов 802 (данное семейство растет по мере увеличения скоростей передачи данных и расширения функционала). Часть стандартов беспроводной связи вышла из сотовой телефонии (стандарты Bluetooth, Wireless Application Protocol (WAP) и Third-Generation (3G)). Кроме них, представлены стандарты, являющиеся расширениями обычных промышленных шин (к примеру, Wireless DeviceNet), а также стандарты базирующиеся на специальных областях применения (радиочастотная идентификация или RFID-технология, а также системы чтения, обработки и вычисления штрих-кодов).

На сегодняшний день в диапазоне частот 2,4 ГГц наиболее популярными технологиями беспроводной передачи данных являются WiFi, Bluetooth и ZigBee. Несмотря на то что порой в данных технологиях видят конкурентов, каждая из них обладает уникальными параметрами, определяющими область их применения.

В табл. 1 представлены основные стандарты беспроводной связи.

ТАБЛИЦА 1.
СРАВНЕНИЕ СТАНДАРТОВ СЕМЕЙСТВА 802.15 И 802.11В

Технология Стандарт	WiFi		Bluetooth 802.15.1	ZigBee 802.15.4		
	802.11b	802.11g				
Частота, ГГц	2.4	2.4	2.4	0.868	0.915	2.4
Скорость	11 Мбит/с	54 Мбит/с	1 Мбит/с	20 кбит/с	40 кбит/с	250 кбит/с
Выходная мощность, дБм	20	20	0-20	0		
Дальность, м	100	100	10-100	10-100		

WiFi

Технология WiFi [4, 5] базируется на стандарте IEEE 802.11 [6]. Данный стандарт устанавливает протоколы, посредством которых организуются локальные беспроводные сети (WLAN). Два основных из них – это протокол управления доступом к среде MAC (Medium Access Control) и протокол передачи сигналов в физической среде PHY. Основным методом доступа к среде стандарт 802.11 определяет механизм CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – множественный доступ с обнаружением несущей и предотвращением коллизий). В основе данного стандарта лежит сотовая архитектура, при этом сеть может включать как одну ячейку, так и несколько. Каждая сота управляется базовой станцией. Базовая станция совместно с рабочими станциями пользователей, находящимися в пределах радиуса ее действия, формируют базовую зону обслуживания. Точки доступа многосотовой сети находятся во взаимодействии друг с другом посредством распределительной системы, которая является эквивалентом магистрального сегмента кабельных ЛВС. В связи с тем, что сетевая аппаратура, функционирующая с максимальной скоростью, работает в с меньшим радиусом действия по сравнению с устройствами, работающими на более низких скоростях, стандарт 802.11 предусматривает автоматическое уменьшение скорости при снижении качества сигнала. Кроме того, понижение скорости обмена данными снижает энергопотребление, продлевая срок работы устройства от батарей. Таким образом, WiFi предназначен для трансляции достаточно больших объемов данных, в частности, для передачи потокового видео, высококачественного аудио- и голосовых сообщений. В табл. 2 представлены самые известные беспроводные стандарты.

ТАБЛИЦА 2
СТАНДАРТЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ СЕМЕЙСТВА 802.11

№ п/п	Название	Скорость	Частотный диапазон	Дата принятия	Примечание
1	802.11	1 Мбит/с и 2 Мбит/с	2,4 ГГц и ИК	1997 г.	изначальный
2	802.11a	54 Мбит/с	5 ГГц	1999 г.	
3	802.11b	5,5 и 11 Мбит/с	2,4 ГГц и ИК	1999 г.	улучшения к 802.11
4	802.11g	54 Мбит/с	2,4 ГГц	2003 г.	обратная совместимость с b
5	802.11n	600 Мбит/с	2,4-2,5 или 5 ГГц	сентябрь 2009 г.	Обратная совместимость с 802.11a/b/g
6	802.11ac	до 6,77 Гбит/с для устройств, имеющих 8 антенн	5 ГГц	январь 2014 г.	новый стандарт IEEE снижение энергопотребления
7	802.11ad	до 7 Гбит/с	60 ГГц	Октябрь 2014 г.	на дистанциях до 10 м

Bluetooth

Технология Bluetooth [7] базируется на стандарте IEEE 802.15.1, определяющем работу портативных средств связи на малых расстояниях между мобильными персональными компьютерами, мобильными телефонами и иными компактными устройствами. Bluetooth является недорогим радиоинтерфейсом, имеющим низкое энергопотребление, способным организовать персональные сети и обеспечивающим передачу различных данных в режиме реального времени. Первые спецификации определяли дальность действия радиоинтерфейса в пределах 10 метров, в настоящее же время определена дальность действия около 100 метров. Для функционирования Bluetooth используется нижний диапазон (частота 2,45 ГГц). Данный диапазон определен для работы промышленных, научных и медицинских приборов (ISM – industrial, scientific, medical). Пропускная способность радиоканала равна 1 Мбит/с. Это позволяет организовать асимметричный канал для передачи данных со скоростями 723,3/57,6 кбит/с либо полнодуплексный канал со скоростью 433,9 кбит/с. В случае передачи малых объемов данных через Bluetooth можно организовать до трех дуплексных аудиоканалов со скоростью 64 кбит/с в каждом направлении соответственно. Кроме того, реализована комбинированная трансляция данных и звука. Технология Bluetooth поддерживает спецификацию стандарта локальных сетей IEEE 802, применяет сигналы с расширением спектра методом скачкообразной перестройки частоты (FHSS) по псевдослучайному закону со скоростью 1600 переключений в секунду в полосе 2400–2483,5 МГц. Bluetooth функционирует в виде многоточечного радиоканала, управляемого, как и в сотовой связи, многоуровневым протоколом. В свою очередь, стандарт Bluetooth 2.0 уже имеет возможность организовать сеть с емкостью до 256 модулей.

ZigBee

Стандарт ZigBee (IEEE, 802.15.4) [8] разработан для низкоскоростных персональных сетей беспроводной связи – Low Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN). За ним зарезервировано 27 каналов в трех эфирных диапазонах, из которых общий для всего мира на частоте 2,4 ГГц (16 каналов), дополнительный – для США на частоте 915 МГц (10 каналов) и один дополнительный канал для Европы на частоте 868 МГц. Скорость трансляции данных между клиентами определяется числом занятых каналов и находится в пределах от 256 до 20 кбит/с. Доступ к среде выполняется в диапазонах частот, не требующих лицензирования ISM (Industrial, Scientific and Medical), физический уровень использует двоичную фазовую манипуляцию (BPSK) на частотах 868/915 МГц и квадратичную фазовую манипуляцию со смещением (QPSK) на частоте 2,4 ГГц. Для доступа к каналу применяется метод множественного доступа к среде с контролем несущей и предотвращением коллизий (CSMA-CA). Этот порядок, базирующийся на выявлении состояния канала связи непосредственно перед передачей, существенно сокращает столкновения, обусловленные передачей данных сразу несколькими клиентскими местами. Стандарт 802.15.4 базируется на полудуплексной передаче данных. Благодаря этому метод CSMA-CA применяется не для обнаружения коллизий, а только для их предотвращения.

Стандартом ZigBee определены следующие типы устройств: координаторы, маршрутизаторы и оконечные устройства.

В каждой сети должен быть всего один координатор [9]. Его главной задачей является задание параметров для создания сети и запуск процесса настройки. В процессе настройки осуществляется выбор радиочастотного канала, уникального сетевого идентификатора и набора рабочих параметров.

Маршрутизаторы применяются для расширения радиуса действия сети. Маршрутизаторы способны выполнять функции и ретрансляторов между далеко размещенными устройствами.

Оконечные устройства в маршрутизации не участвуют.

Множество ZigBee-устройств могут выполнять совместную работу, в общей радиосети, в стандартной иерархии типа «звезда» и в смешанной топологии без единого координатора.

При подключении маршрутизаторов и других устройств к сети они получают от координатора или от маршрутизатора информацию о ней и по данной информации задают рабочие параметры, исходя из параметров сети.

Сети ZigBee просты в их организации, т.к. они создаются автономно.

Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) в основном предназначен для применения в качестве средства связи между автономными приборами и оборудованием.

Стандарт Third-Generation (3G) является стандартом сотовой телефонии, контролируемым Международным союзом по телекоммуникациям (ITU). Скорость трансляции данных в этом стандарте составляет 2 мбит/с для стационарных и 384 кбит/с для мобильных систем. [10].

Стандарт Wireless Application Protocol (WAP) – еще один стандарт сотовой связи, в основе имеет язык WML (wireless markup language). [11].

Выбор технологии беспроводного обмена данными

Результат сравнения радиомодулей, применяемых основными технологиями беспроводной передачи данных, представлен в табл. 3. Стандарт При ZigBee, наряду с наименьшим потреблением энергии, позволяет организовывать локальные сети емкостью до 65536 узлов, в свою очередь, сопрягаемых с различными датчиками, управляющими устройствами и исполнительными механизмами. Также данный стандарт позволяет создавать сети сотовой архитектуры, охватывающие всю территорию объекта. Однако основной недостаток ZigBee –

проблемы с совместимостью оборудования. Стандарт WiFi отличается не в лучшую сторону высоким потреблением энергии, а Bluetooth - не имеет возможностей создания сети в масштабах стандарта ZigBee. Стандарты, базирующиеся на сотовой связи, рассматриваться при сравнении технологий не будут в силу их привязки к операторам сотовой связи и их оборудованию.

ТАБЛИЦА 3.
СРАВНЕНИЕ РАДИОМОДУЛЕЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

		WiFi	Bluetooth	ZigBee
		APM6125	UARTDNG101	Freescall Semiconductor MC13192
Диапазон рабочих частот, ГГц		2,4-2,497	2,4-2,4835	2,405-2,480
Выходная мощность, дБм		13,5	4	0-4
Потребляемый ток	В режиме передачи	190 мА	до 61 мА	30-35 мА
	В режиме приема	150 мА	Нет данных	37-42 мА
	В режиме ожидания	Нет данных	Нет данных	0,5-0,8 мА
	В энергосберегающем режиме	1 мА	Нет данных	1-35 мкА
Напряжение питания, В		3,3	3,3 и 5	2,0-3,4
Чувствительность, дБм		-85 при скорости передачи 11 Мбит/с	-78	-92
Скорость передачи данных по радиоканалу		1; 2; 5,5; 11 Мбит/с	до 723 кбит/с	250 кбит/с
Рабочий диапазон температур, °С		-40..+90	-40..+105	-40..+85

Главной задачей систем автоматизации является передача данных на небольшие расстояния. Разработчики данных систем сталкиваются с требованиями обеспечения мобильности диагностируемого оборудования, восстановления связи между объектами, выявления ресурсов и их использования, сокращения расходов на монтаж.

Также есть необходимость применения персональных сетей беспроводной связи (Wireless Personal Area Networks – WPAN) на нижнем уровне сетевой иерархии автоматизации предприятий. Сеть WPAN является системой обмена данными с малым радиусом охвата и достаточно низкими скоростями трансляции данных. Не требующий лицензирования частотный диапазон [4] 2,4 ГГц стал часто используемым для промышленной, научной, медицинской аппаратуры (ISM). Кроме того, в данном диапазоне задействованы недорогие беспроводные решения, предлагаемые для сетей WPAN.

Технологии беспроводного управления производством печатных плат

Типовой процесс изготовления печатной платы (ПП) состоит из следующих этапов:

- 1 – Изготовление фотошаблонов печатной платы;
- 2 – Получение заготовок печатной платы;
- 3 – Получение монтажных и переходных отверстий;
- 4 – Подготовка поверхности печатной платы;
- 5 – Металлизация печатной платы;
- 6 – Нанесение защитного рельефа и паяльной маски на печатную плату;
- 7 – Травление заготовки печатной платы;
- 8 – Оплавление заготовки печатной платы;
- 9 – Обработка печатной платы по контуру;
- 10 – Испытания печатной платы;
- 11 – Контроль печатной платы;
- 12 – Устранение неисправностей печатной платы.

На рис. 5. представлена упрощенная схема процесса изготовления печатных плат на основе сервера управления.

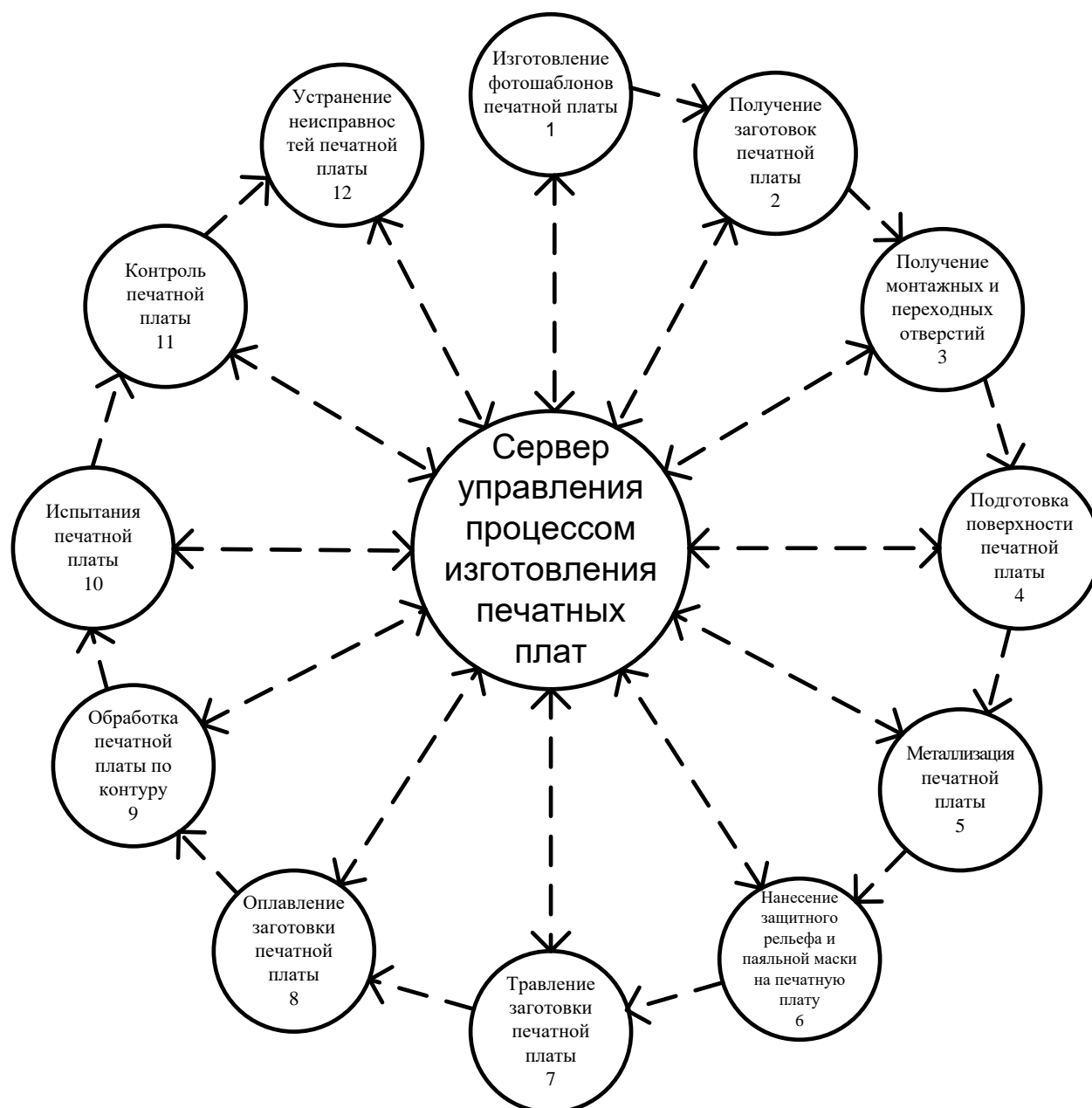


Рис. 5. Упрощенная схема процесса изготовления печатных плат на основе сервера управления

На каждой стадии для контроля над процессом задействованы ПК с системой учета материалов, заготовок, сменных заданий и отчетов о выполненных работах. ПК включены в беспроводную сеть и соединяются посредством Wi-Fi-адаптеров (встроенных или USB-типа), наиболее распространенных и доступных по цене решений, по сравнению с Bluetooth или ZigBee. Локальная беспроводная сеть организована на сервере через маршрутизатор.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для процесса производства печатных плат на одном из приборостроительных предприятий используется оборудование, перечисленное в таблице 4 с подробным пооперационным перечислением [12].

Представленный комплект оборудования дает возможность изготавливать печатные платы, отслеживать выполнение работ на этапах производства, а также расход материалов, реактивов и заготовок посредством прикладного программного обеспечения, выполняющего перечисленные задачи в комплексе с данным оборудованием.

ТАБЛИЦА 4.
ПЕРЕЧЕНЬ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

№ п/п	Операция	Оборудование
1	Формирование рисунка	Конвейерная установка травления Ten CC RESCO MINI ETCHER.
2	Изготовление фотошаблон-ов	AP-430A. Автоматическая установка для точной пробивки базовых отверстий в фотошаблонах печатных плат. Лазерный растровый фотопринтер VTS9008.
3	Подготовка заготовок	Автоматическая зачистная машина. TDZ-600A. Установка для точного сверления базовых отверстий в слоях печатных плат
4	Сверление, фрезерование печатных плат	Станок для сверления базовых отверстий и установки штифтов в гибкие и жёсткие платы. Станок для извлечения штифтов из заготовки. Двухшпиндельный сверлильно-фрезеральный станок TIMAX MDR-2002.
5	Обеспыливание и антистатическая обработка заготовок	Установка обеспыливания и снятия пыли и статического электричества с поверхности заготовок односторонних и двусторонних печатных плат
6	<u>Ламинирование</u>	Автоматический ламинатор CSL-A25T/H.
7	<u>Экспонирование</u>	Установка двустороннего экспонирования C SUN UVE-M545B, 5 кВт.
8	<u>Скрайбирование заготовок</u>	Установка скрайбирования печатных плат SUC-888.
9	<u>Металлизация переходных отверстий</u>	Конвейерное оборудование фирмы Ten CC-RESCO для прямой металлизации.
10	Нанесение маски, маркировки	Вентилируемый сушильный шкаф SMO-5. Полуавтоматический принтер CD-6575.
11	Золочение/никелирование/горячее лужение	Флюсователь Flux Coater. Установка NTO-1824 для горячего лужения с выравниванием припоя горячим воздухом.
12	Контроль качества, электротестирование	Установка высокоточного контроля отверстий GAM 980. Установка автоматической оптической инспекции (АОИ) TOPTECH T8.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При организации системы беспроводного управления производством печатных плат на одном из приборостроительных предприятий по созданной ранее упрощенной схеме процесса изготовления печатных плат на основе сервера управления было подобрано оборудование для выполнения работ на ключевых этапах (в том числе и внутри этапов). Подбранное оборудование предложено к приобретению, организовано внедрение системы управления производством.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения исследования авторами проведено сравнение существующих беспроводных технологий, их стандартов. Формализован процесс производства печатных плат, разработана система управления производством печатных плат на основе беспроводной технологии. Подбрано оборудование, выполнен опытный запуск системы. Полученные результаты позволяют существенно сэкономить время и финансы на прокладке проводной сети, получив при этом удобство работы, а главное - скорость и надежность передачи данных, удовлетворяющих требованиям производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монтегю Джим. Беспроводные технологии в сфере управления // CONTROL ENGINEERING. 2002. № 1.
2. Растягаев Д. В. Информационные сети. Лекция 10. Беспроводные технологии вычислительных сетей. Российский новый университет. 65 с. URL: http://rdv.rosnou.ru/it_net/it_net_10.pdf.
3. IT-WAVE. Стандарты беспроводной связи. URL: <http://it-wave.ru/background/technology/wireless-standards>.
4. Проблемы функционирования беспроводных устройств Bluetooth и IEEE 802.11 в нелицензируемом диапазоне ISM 2,4ГГц и пути их решения // Беспроводные технологии. 2006. № 3.
5. WiFi specification. 2006. URL: http://www.wifi.com/p_faq.html

6. IEEE 802.11XX specification. 2005. URL: <http://www.ieee.org/portal/site>
7. Bluetooth Technology Website. URL: <https://www.bluetooth.com>.
8. ZigBee specification. ZigBee Document 053474r06.Version1.0. 2005. URL:<http://www.zigbee.org/>
9. Опыт построения сети беспроводных датчиков для мониторинга систем ОВК зданий // АВОК. 2006. № 1.
10. ITU Committed to connecting the world.URL: [https:// : www.itu.int](https://www.itu.int).
11. WAP Forum Specifications.URL: <http://www.wapforum.org/what/technical.htm>.
- 12.Рекомендации по подбору оборудования для производства печатных плат. URL: <http://www.tabe.ru/equipment/index.php?cid=12&stypе=tech>.

УДК 621.317.39

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОСЦИЛЛИСТОРНОГО ЭФФЕКТА

А. И. Чередов, А. В. Щелканов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Разработка первичных измерительных преобразователей с прямым преобразованием различных физических величин в частоту и исследование их характеристик является актуальной задачей. В данной работе описаны характеристики первичных измерительных преобразователей с частотным выходным сигналом на основе осциллисторного эффекта в электронном германии. Получено, что чувствительность преобразователей повышается при понижении температуры. Определены границы линейности статической характеристики преобразования для преобразователей напряжения и магнитной индукции. Описаны способы расширения диапазона преобразования. Приведены результаты экспериментальных исследований осциллисторных преобразователей напряжения и магнитной индукции при комнатных и криогенных температурах.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, осциллистор, частотный выход, чувствительность сенсора, диапазон преобразования.

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований показывают, что при возникновении некоторых типов неустойчивости в полупроводниковых образцах в них самопроизвольно возбуждаются колебания электрического напряжения. Частота этих колебаний может зависеть от многих факторов, что представляется перспективным с точки зрения использования подобных неустойчивостей для построения частотных первичных измерительных преобразователей (ПИП) различных физических величин. Одним из таких эффектов является осциллисторный эффект, возбуждающийся в полупроводниковом образце, помещенном в продольные электрическое и магнитное поля и проявляющийся в возникновении колебаний протекающего по образцу электрического тока [1]. Причем одновременно с колебаниями тока в образце возникают колебания напряжения той же частоты. Образец, в котором проявляется осциллисторный эффект, в литературе получил название «осциллистор». Для удобства дальнейшего изложения введем понятие «осциллисторные колебания», под которыми будем понимать как колебания тока, так и колебания напряжения.

В основе осциллисторного эффекта лежит явление винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы полупроводникового образца. Существуют два вида неустойчивости: конвективная и абсолютная. В результате развития абсолютной неустойчивости в образце спонтанно возникают колебания тока, что может быть использовано для создания генератора электрических колебаний.

Для возбуждения осциллисторного эффекта необходимо выполнить ряд условий. Во-первых, напряженности электрического и магнитного полей должны превышать некоторые критические значения. Во-вторых, необходимо обеспечить наличие в объеме полупроводникового образца электронно-дырочной плазмы [2]. Электронно-дырочная плазма может быть создана инжекцией носителей заряда с помощью соответствующих контактов, выполненных на гранях образца при пропускании по ним электрического (инжектирующего) тока. Также электронно-дырочная плазма может создаваться инжекцией лучем света определенной интенсивности. Электрическое поле может быть создано приложением напряжения к контактам, выполненным на торцевых гранях осциллистора. Магнитное поле может быть создано постоянными магнитами или другим способом. Весьма интересным свойством осциллисторного эффекта, основанного на возбуждении абсолютной неустойчи-

ности полупроводниковой плазмы, является зависимость частоты генерируемых колебаний от различных факторов: напряженности электрического и магнитного полей, параметров электронно-дырочной плазмы, размеров образца и др.

Осцилляторный эффект наблюдается как в простых полупроводниках (германий, кремний), так и в полупроводниковых соединениях (антимонид индия InSb). Экспериментальные исследования характеристик осцилляторов, проведенные для образцов из антимонида индия показывают, что осцилляторный эффект в них, из-за высокой подвижности электронов, наблюдается при меньших значениях напряженностей электрического и магнитного полей, чем в кремнии и германии. Но антимонид индия характеризуется малой шириной запрещенной зоны и, вследствие этого, даже при малых значениях напряженности электрического поля в осцилляторе происходит изменение параметров полупроводниковой плазмы. Кроме того, на параметры плазмы сильно влияют различные факторы окружающей среды. Все это обуславливает большую нестабильность характеристик осциллятора из антимонида индия.

Кремний, в отличие от антимонида индия, обладает низкой подвижностью носителей зарядов при температуре 300 К, что требует для возбуждения осцилляторного эффекта достаточно больших значений напряженности электрического и магнитного полей. Но при этом кремний обладает сравнительно большим значением ширины запрещенной зоны и параметры осциллятора из кремния характеризуются стабильностью во времени.

Значения пороговых полей, при которых возбуждается осциллятор из германия, значительно меньше, чем у осциллятора из кремния. Ширина запрещенной зоны германия больше, чем у антимонида индия, но меньше, чем у кремния. Это обуславливает более высокую стабильность характеристик осциллятора из германия, чем осциллятора из антимонида индия, но меньшую, чем из кремния.

Рассмотренные свойства осцилляторного эффекта позволяют использовать его для разработки первичных измерительных преобразователей различных физических величин. В работах [3 – 5] представлены результаты экспериментальных исследований разработанных преобразователей с осцилляторами из кремния и германия, которые позволяют оценить их некоторые характеристики. Но вопрос, касающийся метрологических характеристик осцилляторных ПИП, нуждается в дополнительных исследованиях. Данная работа посвящена рассмотрению метрологических характеристик первичных измерительных преобразователей напряжения и магнитной индукции на основе осцилляторного эффекта в германии.

II. ТЕОРИЯ

К основным характеристикам ПИП на основе осцилляторного эффекта следует отнести: статическую характеристику преобразования, чувствительность, диапазон преобразования и погрешность.

Исходя из механизма возбуждения абсолютной винтовой неустойчивости, частота осцилляторных колебаний будет определяться как частотой вращения винтовых возмущений в продольном магнитном и поперечном электрическом полях амбиполярного происхождения, так и амбиполярным сносом винтовых возмущений под действием внешнего продольного электрического поля. В первом случае, соответствующему осциллятору из собственного полупроводника, в котором амбиполярный снос отсутствует, частота на пороге возбуждения зависит от индукции внешнего магнитного поля и пропорциональна ей. В осцилляторе из несобственного полупроводника наблюдается сильный амбиполярный снос возмущений, что эквивалентно азимутальному вращению возмущений. Частота осцилляторных колебаний в этом случае определяется скоростью амбиполярного сноса винтового возмущения. В реальном осцилляторе существует как вращение винтовых возмущений под действием магнитного поля, так и их снос под действием электрического поля. Это означает, что частота осцилляторных колебаний определяется как частотой вращения, так и скоростью сноса винтовых возмущений. Пренебрегая различными нелинейными эффектами в осцилляторе из германия, приближенную формулу для частоты можно представить в виде:

$$f \cong \frac{0,18\mu_a}{a} E + \frac{0,71D_a(\mu_n - \mu_p)}{a^2} B, \quad (1)$$

где μ_a – амбиполярная подвижность; μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок; D_a – коэффициент амбиполярной диффузии; a – поперечный размер осциллятора.

Выражение (1) показывает, что на основе осцилляторного эффекта возможно построение ПИП напряжения (ПНЧ) и магнитной индукции (ПМИ) с частотным выходным сигналом. Статические характеристики данных преобразователей можно представить в виде:

преобразователь напряжения ($B = \text{const}$)

$$f \cong f_0 + SU, \quad (2)$$

преобразователь магнитной индукции ($U = \text{const}$)

$$f \cong f_0 + SB, \quad (3)$$

где f_0 – частота на пороге возбуждения; S – чувствительность, определяемая параметрами электронно-дырочной плазмы и размерами осциллятора.

Исследования показывают, что при выходе напряженности электрического поля за некоторое значение $E \geq (1.5 \dots 1.8)E_{II}$, характеристика становится нелинейной. К частоте на пороге возбуждения добавляется поправка Δf_E , которая находится как [6]:

$$\Delta f_E = f_E \left(\frac{E}{E_{II}} - 1 \right) = f_E \Delta E, \quad (4)$$

где f_E – частота, обусловленная превышением поля E над пороговым полем E_{II} .

При $\Delta E < 1$ ($B = B_{II}$) частота ПНЧ будет определяться выражением (2).

Как и в случае напряженности электрического поля, при выходе индукции B за некоторое значение к частоте на пороге возбуждения добавляется поправка Δf_B :

$$\Delta f_B = f_B \left(\frac{B}{B_{II}} - 1 \right) = f_B \Delta B$$

Значение чувствительности осцилляторного ПИП может быть получено из его статической характеристики.

Диапазон преобразования ПИП на основе осцилляторного эффекта имеет принципиальное ограничение снизу, которое имеет чисто физический характер и обусловлено срывом генерации при невыполнении критерия возбуждения осциллятора. Ограничение диапазона преобразования сверху обусловлено рядом причин: 1) проявлением нелинейных эффектов, которые могут привести к возбуждению многомодальных режимов и срыву генерации; 2) резким возрастанием нелинейности статической характеристики преобразователя, при этом погрешность линейности может достигать 100%.

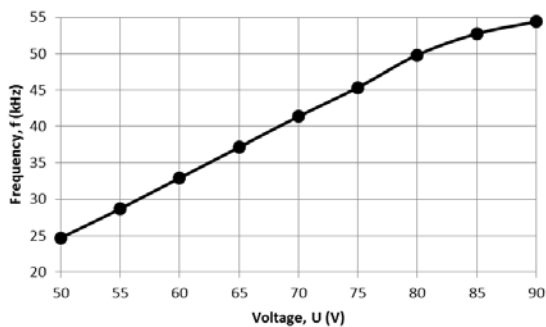
Таким образом, ограничение диапазона сверху имеет как физический характер, так и метрологический характер.

В общем случае погрешность осцилляторных ПИП обусловлена нестабильностью частоты осцилляторных колебаний во времени, нелинейностью статической характеристики, изменением температуры окружающей среды и др.

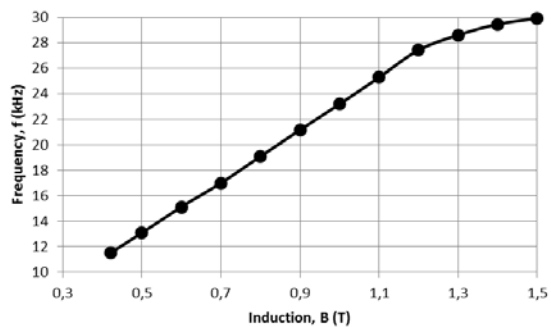
III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Как указано ранее, чувствительность осцилляторных ПИП зависит от многих факторов, и на практике она определяется экспериментально. Исследования разработанных ПНЧ показали, что при температурах (295...300) К чувствительность достигает (0.8...1.1) кГц/В. При этом нижний предел преобразования составляет десятки вольт (30...50) В. На рис. 1а показана характеристика преобразования ПНЧ на основе осциллятора из n-Ge марки ГЭС-30.

На рис. 1б приведена статическая характеристика ПМИ на основе осциллятора из n-Ge марки ГЭС-45, снятая при температуре 295 К. Чувствительность преобразователя в диапазоне (0.4...1.2) Тл достигает 20 кГц/Тл.



а) преобразователь напряжения



б) преобразователь магнитной индукции

Рис. 1. Статическая характеристика преобразования

Из выражения (1) видно, что чувствительность осцилляторных ПИП повышается при уменьшении поперечного размера осциллятора a и при увеличении амбиполярной подвижности носителей зарядов электронно-дырочной плазмы. Понижение температуры осциллятора также приводит к повышению чувствительности осцилляторных ПИП. Например, при понижении температуры осциллятора до температуры 77 К чувствительность исследованных образцов ПНЧ повышалась до 40 кГц/В, а при температуре 4.5 К – до 170 кГц/В. Чувствительность ПМИ при $T = 77$ К возрастает до (1...1.2) МГц/Тл, а при $T = 4.2$ К достигает 5 МГц/Тл.

Нижний предел преобразования $U_H = U_{II}$ осцилляторного ПНЧ определяется индукцией в рабочем зазоре магнитной системы преобразователя, и для разработанных ПНЧ с индукцией (0.35...0.4) Тл, составляет значение (35...50) В. Увеличение поперечного размера осциллятора приводит к понижению пороговой напряженности электрического a , следовательно, и к понижению нижнего предела преобразования ПНЧ. Но увеличение поперечного размера приводит к существенному уменьшению чувствительности осцилляторного ПИП.

Понижение нижнего предела диапазона преобразования ПНЧ достигается также и понижением его температуры. Экспериментальные исследования, проведенные при $T = 4.2$ К и $T = 77$ К показали, что значение U_{min} может быть уменьшено до (3...5) В.

Таким образом, получено, что нижний предел диапазона преобразования ПНЧ на основе осцилляторного эффекта при комнатных температурах равен (35...50) В, а при криогенных температурах ($T \leq 80$ К) понижается и составляет (3...5) В.

Ограничение диапазона преобразования ПНЧ сверху обусловлено следующими причинами: 1) при большом превышении входным напряжением U порогового значения резко возрастает нелинейность статической характеристики преобразования ПНЧ; 2) разогревом осциллятора протекающим по нему током, что приводит к большой температурной погрешности.

Анализ экспериментальных характеристик преобразования показывает, что в диапазоне от U_H до значения (1.5...1.8) U_H характеристика осцилляторного ПНЧ близка к линейной. Таким образом, для линейной функции преобразования можно считать, что диапазон преобразования ПНЧ лежит в пределах от (30...35) В до (80...90) В при комнатных температурах и от 3 до (10...12) В при криогенных температурах.

Значение нижнего предела диапазона преобразования ПМИ обусловлено пороговым значением индукции $B_H = B_{II}$ для заданного напряжения, приложенного к осциллятору. Экспериментальные исследования показали, что нижний предел диапазона преобразования ПМИ при комнатных температурах и напряжениях, не вызывающих разогрев осциллятора, может быть получен (0.3...0.35) Тл. При понижении температуры нижняя граница диапазона преобразования, как и в случае ПНЧ, смещается в сторону меньших значений. Например, при температуре 77 К он составляет (0.08...0.1) Тл, а при температуре 4.2 К уменьшается до значения 0.03 Тл.

Диапазон преобразования сверху ограничен вкладом нелинейных эффектов в частоту осцилляторных колебаний, приводящим к нелинейности статической характеристики ПМИ. Анализ экспериментальных результатов показал, что в диапазоне индукций от B_H до (1.8...2.0) B_H статическая характеристика ПМИ на основе осцилляторного эффекта близка к линейной.

Повышение верхнего предела диапазона преобразования может достигнуто уменьшением напряженности электрического поля в осцилляторе. Следует отметить, что в этом случае повышается не только верхний предел, но и нижний предел диапазона преобразования и происходит смещение линейного участка статической характеристики в зону больших значений индукции.

Следует отметить, что повышение напряжения выше значения $1.8U_H$ для ПНЧ и индукции выше значения $2B_H$ для ПМИ приводит к возрастанию нелинейности характеристики преобразования. В этом случае диапазон преобразования будет определяться требуемой погрешностью линейности.

Выше отмечено, что одной из составляющих погрешности осцилляторных ПИП является временная нестабильность частоты осцилляторных колебаний, которая в большой степени зависит от состояния поверхности осциллятора и теплового режима его работы. Результаты экспериментальных исследований разработанных ПИП, проведенных в различных условиях, показали, что при комнатных температурах относительная нестабильность частоты достигала (0.1...0.3) %, а при помещении преобразователя в жидкий азот она уменьшалась в несколько раз и составляла 0.05 % и менее. При этом существенно уменьшается временной дрейф частоты, обусловленный в основном изменением состояния поверхности и, соответственно, скорости поверхностной рекомбинации. В результате исследований, проведенных при температуре (293...300) К, получено, что временной дрейф частоты достигал (3...5) % за месяц. Экспериментальные исследования осцилляторных ПИП, проведенные в жидком азоте показали, что дрейф частоты составлял 0.02 % в месяц и меньше. Таким образом, для уменьшения погрешности, обусловленной нестабильностью частоты генерации осциллятора, необходимо стабилизировать состояние поверхности осциллятора.

В разработанных ПИП, с целью защиты поверхности осцилляторного преобразователя заливалось силиконовое масло или на поверхность наносилась тонкая пленка диоксида кремния SiO_2 , при этом снижался не только временной дрейф частоты, но и уменьшалась относительная нестабильность выходной частоты.

Из представленных результатов экспериментальных исследований видно, что значение выходной частоты осцилляторного ПИП сильно зависит от температуры окружающей среды. Например, в области комнатных температур чувствительность ПИП достигает $(300 \dots 500) \text{ Гц}/^\circ\text{C}$ и возрастает при понижении температуры. Отсюда погрешность, вызванная изменением температуры осцилляторного преобразователя, может достигать единиц процентов. Подобное значение температурной погрешности обуславливает необходимость использовать осцилляторные ПИП при постоянной температуре окружающей среды, например, в криогенной жидкости, градуируя их для каждой рабочей температуры, либо осуществлять термостатирование преобразователя.

Следует отметить, что температурная погрешность может быть уменьшена включением последовательно с осциллятором термочувствительного элемента, например, терморезистора.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов экспериментальных исследований характеристик преобразователей напряжения и магнитной индукции на основе осцилляторного эффекта показывает, что их статическая характеристика преобразования линейна в диапазоне от U_{II} до $1.8U_{II}$ и от B_{II} до $2B_{II}$, который смещается в сторону меньших значений при понижении температуры. Понижение температуры приводит также к повышению чувствительности. Рассмотренные ПИП могут работать в широком интервале температур, но наиболее целесообразно использовать их при низких температурах, например, в криогенных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov I. L., Ryvkin S. M. Occurrence of Current Oscillations in Specimens of Ge Placed in an Electric Field and a Longitudinal Magnetic Field // Zh. Tekhn. Fiz. 1958. Vol. 28, P. 774. [Engl. transl. Sov. Phys. Tech. 1958. Phys. 3, 722].
2. Hurwitz C. E., Whorter A. L. Mc.Grawing helical density waves in semiconductor plazmas // Physical Review. 1964. Vol. 134A. P. 1033–1050.
3. Gaman V. I., Drobot P. N. Oscillistor Sensors with a Frequency Output based on a Silicon Structures // Proceedings 4th International conference on actual problems of electronic instrument engineering APEIE-98. Novosibirsk, 1998. Vol.1. Selected papers. P.133–135.
4. Cheredov A.I., Shchelkanov A.V. Frequency converters based on oscillistor // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2014. 12th International Conference DOI:10.1109/APEIE. 2014. 7040846.
5. Cheredov A. I., Shchelkanov A.V. Displacement sensors with frequency output based on helical instability (2015) 2014 // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Dynamics 2014. Proceedings. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005645.
6. Karavaev G. F., Chuprikov N. L. Generalization of the nonlinear theory of surface-helical instability of semiconductor plasma in cylindrical specimens. Physics of Semiconductors and Dielectrics // Soviet Physics Journal. April 1985. Vol. 28, no. 4. P. 257–262.

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.7

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

В. М. Белов², А. И. Пестунов¹, Т. М. Пестунова¹,

¹Новосибирский государственный университет экономики и управления, г. Новосибирск, Россия

²«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Новосибирск, Россия

Аннотация – В статье развивается подход авторов к оценке рисков информационной безопасности (далее - ИБ) на основе анализа бизнес-процессов (далее - БП), представленных в формальных нотациях. Проведен анализ существующих методик оценки рисков с выявлением их недостатков в контексте анализа БП. Предложена методика оценки рисков, учитывающая критичность БП, дифференцированность значимости активов относительно БП, а также влияние момента реализации возможных угроз на последствия для БП и связанного с этими последствиями ущерба.

Ключевые слова : бизнес-процесс, информационная безопасность, риски бизнес-процесса, риски информационной безопасности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Постановка задач информационной безопасности в контексте бизнес-процессов позволяет соотнести аспекты безопасности с результатами бизнес-процессов, а значит, и с целями деятельности организации [1-7]. Бизнес-процессы организаций и предприятий не являются статичными. Их изменчивость обусловлена многими причинами, в частности, слиянием фирм, оптимизацией организационных структур, внедрением автоматизированных технологий и т.п., что требует отражения происходящих изменений в системе обеспечения ИБ. При этом изменения могут касаться всех элементов системы ИБ: от концептуальных документов, инструкций и регламентов до состава и конфигурации программно-технических решений.

В данной работе предлагаются способы оценки рисков ИБ, направленные на обеспечение ИБ организаций в рамках непрерывности бизнес-процессов.

Анализ моделей бизнес-процессов даёт возможность отследить влияние происходящих изменений на многие аспекты ИБ. В частности, в [1, 2] и ряде последующих работ авторами был предложен автоматизированный подход к управлению правами доступа на основе анализа EPC-модели [8]. В [7] представлена обобщённая схема взаимодействия бизнес-процессов и среды в контексте которой рассматривается управление ИБ, опираясь на системы комплексной автоматизации деятельности предприятия. Материалы зарубежных источников [3, 4, 5, 9] также показывают, что анализ бизнес-процессов организации имеет большое значение для определения рисков ИБ, а также для построения системы управления ИБ. В частности, в [10, 11] предлагается метод расширения нотации BPMN [12] для управления рисками ИБ. В [13] автор предлагает улучшенную версию нотации EPC, которую обозначает как «Security - Oriented EPC». Данная версия была получена путем расширения языка EPC и его конструкций с целью сопоставления данных с моделью ISSRM [14] для оценки рисков ИБ.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим ряд важных риск-ориентированных аспектов моделирования бизнес-процессов с целью получения данных для дальнейшей оценки рисков ИБ. Во-первых, это критичность (важность) бизнес-процесса К (БП), где БП- бизнес-процесс. Важность процесса определяется степенью его вклада в достижение стратегических целей организации. Бизнес-процесс, критичность которого высока, и связанные с ним активы должны иметь больший приоритет при обеспечении безопасности, нежели бизнес-процессы с более низкой критичностью (при прочих равных параметрах).

Во-вторых, следует обратить внимание на ценность актива относительно конкретного бизнес-процесса Ц (А, БП), где А-актив, используемый в БП. В организации ценность одного и того же актива (информации, ресурса) может быть различна в контексте разных БП.

В-третьих, реализация всех этапов каждого БП требует определенного времени, а сам БП может носить итеративный характер. Время итерации, предполагаемое или рассчитанное на основе реальной ситуации, - нормативное время прохождения всех этапов БП от первого действия до получения результата, достижения цели БП. Изменение времени возможно из-за ошибок или злоумышленных преднамеренных действий исполнителя, ненадлежащего состояния ресурсов, нарушения своевременности входа процесса, излишних затрат времени исполнителей на реализацию предусмотренных процессом работ, несогласованности действий исполнителей и т.п. Последствиями для организации в данном случае могут быть: срыв сроков выполнения, неполное достижение целей, задержка процесса, излишняя трата ресурсов (финансовых, материальных, человеческих). При этом для различных БП существует различный уровень критичности изменения времени итерации, т.е. насколько критично для организации в контексте ущерба будет изменение времени достижения цели БП. Если каждую итерацию БП рассматривать как ограниченную во времени совокупность взаимосвязанных работ (например, от поступления очередного заказа до его исполнения), то для оценки допустимых сдвигов окончания каждого этапа БП в пределах итерации можно использовать методы управления проектными рисками, в частности методы сетевого планирования с выделением критических путей и расчётом наиболее поздних моментов начала-окончания этапов относительно момента начала итерации процесса. Ущерб от инцидента, повлекшего нарушение некоторого актива, может зависеть от момента времени этого инцидента относительно начала-окончания БП. В частности, возможны случаи, когда инцидент, связанный, например, с нарушением целостности актива, может привести к большему ущербу, если он происходит ближе к окончанию итерации БП, т.е. ближе к достижению цели. При высокой критичности процесса относительно сдвига сроков завершения итерации может не хватить времени для восстановления нормального режима исполнения процесса, либо это восстановление потребует привлечения значительных дополнительных ресурсов и работы в мобилизационном режиме. В результате ущерб от несоблюдения требований ИБ (У) можно представить в виде параметрической функции У (БП, А, Ит), где БП - бизнес-процесс; А – актив, используемый в БП; Ит - потенциально возможный инцидент в момент времени Т.

III. ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ

В нашей работе для оценки критичности БП использован подход [15], согласно которому первым шагом определения критичности является выявление критических факторов успеха (КФУ), под которыми понимаются наиболее значимые показатели, определяющие достижимость бизнес-целей. Получаются в результате декомпозиции стратегических целей. Из всех целей выбираются N наиболее важных, которые и называют КФУ. Для оценки степени достижения данных целей используются количественные и качественные показатели.

Определение критичности (важности) БП является результатом его сопоставления с КФУ. Основная суть сопоставления сводится к тому, что по каждому БП необходимо ответить на вопрос: «Какие КФУ поддерживаются данным БП?». При определении важности БП, помимо сопоставления каждому БП множества КФУ, необходимо совершить обратный проход, при котором для каждого КФУ определяются поддерживающие его БП.

Таким образом, может быть построена матрицу сопоставления БП и КФУ, на основе которой определяется критичность (или обратная величина – не критичность) каждого БП по формуле:

$$K_{БП} = \frac{K_{КФУ}}{O_{КФУ}}, НК_{БП} = 1 - K_{БП}, \quad (1)$$

где $K_{БП}$ – коэффициент критичности БП; $НК_{БП}$ - коэффициент не критичности БП; $K_{КФУ}$ – количество КФУ, относящихся к БП; $O_{КФУ}$ – общее количество КФУ.

На этапе оценки ценности актива (информации, ресурса) необходимо составить перечень активов для каждого БП отдельно, а также определить ценность активов. Важно понимать, что ценность одного и того же актива в контексте различных БП может изменяться. Оценка производится для каждого актива (А-1, А-2, ... , А-N) относительно конкретного БП (БП-1, БП-2, ... , БП-N) по качественной шкале для каждого аспекта безопасности (конфиденциальность, целостность, доступность). Шкала содержит пять уровней оценки (очень высокий, высокий, средний, низкий, очень низкий), которые определяются уровнем возможного ущерба, полученного организацией при нарушении аспекта безопасности актива в каждом БП. Ущерб определяется в контексте влияния инцидента информационной безопасности на параметры БП, от которых зависит достижение соответствующих КФУ. Также может рассматриваться повышение ценности актива на один или два уровня в зависимости от временного фактора (насколько близко к началу-окончанию итерации БП актив используется).

Учет фактора времени проводится по двум составляющим: коэффициенту критичности сроков (для БП), коэффициенту влияния на срок (для угрозы ИБ). Коэффициент критичности сроков определяется для каждого БП по качественной шкале. Основным критерием оценки является финансовый ущерб или соизмеримые ему иные

последствия для организации (репутационные риски, затраты человеческих ресурсов) при изменении времени итерации БП. Коэффициент влияния на срок рассчитывается для каждой угрозы. Следует отметить, что каждая угроза влияет на БП по-разному, в том числе и на временной фактор, в нашем случае на изменение времени итерации БП. Отсюда, для каждой угрозы коэффициент влияния на срок (независимости от срока) можно представить в виде формулы:

$$K_{BC} = \frac{T_{\Delta И}}{T_{И}}, \quad НК_{BC} = 1 - K_{BC}, \quad (2)$$

где K_{BC} – коэффициент влияния на срок БП; $НК_{BC}$ – коэффициент независимости от срока БП; $T_{И}$ – время выполнения одной итерации БП; $T_{\Delta И}$ – фактическое время выполнения одной итерации БП в условиях реализации угрозы. Если результате инцидента $T_{\Delta И} = T_{И}$ ($K_{BC} = 1$) или не превышает резерва времени, допускаемого для данного БП, то БП можно считать устойчивым к соответствующим угрозе внешним (внутренним) воздействиям. Теоретически K_{BC} может возрастать неограниченно, но на практике для каждого БП могут быть определены значения максимально допустимого сдвига сроков, за пределами которого цель бизнес- процесса считается недостигнутой.

Коэффициент критичности сроков определяют следующим образом:

$$K_{КС} = K_{BC} * K_{БП}, \quad (3)$$

где K_{BC} – коэффициент влияния на срок; $K_{БП}$ – коэффициент критичности БП; $K_{КС}$ – коэффициент критичности сроков.

Определение параметров входящих в формулы (1) – (3) является базовым для разработанной нами методики, так как в дальнейшем они будут использованы при расчете итоговых значений величин рисков R:

$$R = K_{БП} * K_{BC} * K_{ВУ} * P_{ИУ} * C_A, \quad (4)$$

где $K_{БП}$, K_{BC} – уже были введены выше; $K_{ВУ}$ – коэффициент возникновения угрозы ИБ; $P_{ИУ}$ – простота использования уязвимости; C_A – ценность актива.

Ценность активов определяли с использованием качественной шкалы, взвешивая оценки следующим образом: очень высокий уровень – 1; высокий уровень – 0,8; средний уровень – 0,5; низкий уровень – 0,2; актив не актуален – 0.

При нахождении коэффициента возникновения угрозы применяем качественную шкалу вида: 0 – возникновение угрозы невозможно в данных обстоятельствах; 0,2 – вероятность возникновения угрозы за одну итерацию бизнес-процесса; 1 – за одну итерацию бизнес-процесса происходит один инцидент.

Коэффициент, учитывающий простоту использования уязвимостей, рассматривали как суммарную характеристику, представляющую собой сумму всех условных баллов, выставленных при экспертном оценивании по балльным шкалам различных параметров уязвимостей (время, необходимое для использования уязвимостей; уровень квалификации, необходимый для использования уязвимостей; уровень знаний об объекте оценки, необходимый для использования уязвимостей; время доступа к объекту оценки, необходимое для использования уязвимостей; программно-аппаратные и иные ресурсы (оборудование), необходимое для использования уязвимостей).

Шкалирование $P_{ИУ}$ проводилось по интервальной шкале вида: высокий уровень – 10-17 баллов = 1; средний уровень – 18-24 балла = 0,6; низкий уровень – больше 24 баллов = 0,2.

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье развивается подход [6, 16] к оценке рисков ИБ на основе формальных моделей БП. Проведен анализ существующих методик оценки рисков с выявлением их недостатков в контексте анализа БП. Предложена методика оценки рисков, учитывающая критичность БП, дифференцированность значимости активов относительно БП, а также влияние момента реализации возможных угроз на последствия для БП и связанного с этими последствиями ущерба. Для расчета этих параметров на основе моделей бизнес- процессов, представленных в стандартных нотациях (в частности, EPC) разработано программное приложение, дополняющее информацию о БП, представленные в EPC, необходимыми данными для расчёта рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пестунова Т.М. Информационная система управления правами доступа на основе анализа бизнес-процессов / Т.М. Пестунова, З.В. Родионова // Доклады ТУСУРа. 2010. № 2 (22), ч. 2. С. 253–256.
2. Родионова З.В. Управление процессом предоставления прав доступа на основе анализа бизнес-процессов / З.В. Родионова, Т. М. Пестунова // Прикладная дискретная математика. 2008. № 2. С. 91–95.

3. Taubenberger S., Jurjens J. IT Security Risk Analysis based on Business Process Models enhanced with Security Requirements. Institute of Computer Science, University of Tartu
4. Rodriguez A., Fernandez-Medina E., Piattini M. A BPMN Extension for the Modeling of Security Requirements in Business Processes. IEICE – Transactions on Information and Systems, Volume E90-D Issue 4, March 2007, Pages 745–752
5. Altuhhova O., Matulevičius R. Security Risk Management using Business Process Modeling Notations. // Institute of Computer Science, University of Tartu. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://courses.cs.ut.ee/2015/SSD/spring/Main/Readings>
6. Пестунова Т.М., Родионова З.В., Горинова С.Д. Анализ аспектов информационной безопасности на основе формальных моделей бизнес-процессов. Доклады ТУСУРа, № 2 (32), июнь 2014. С. 88–92.
7. Ефимов Е.Н., Лапицкая Г.М. Информационная безопасность и бизнес-процессы компании. // Известия ЮФУ. Технич. науки, № 2(149). Таганрог: ЮФУ, 2013. С. 45–48
8. Нотация EPC. [электронный ресурс – 17.09.2014] – http://www.businessstudio.ru/wiki/docs/v4/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/epc_notation.
9. Bradford L., Dumas M. Getting Started with YAWL. Technical Paper, YAWL Foundation, 2007.
10. Altuhhova O. An Extension of Business Process Model and Notation for Security Risk Management. Institute of Computer Science, University of Tartu, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://courses.cs.ut.ee/MTAT.03.246/2014_spring/uploads/Main/bpmn.pdf.
11. Altuhhova O. Developing System Security through Business Process Modelling. Institute of Computer Science, University of Tartu. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://courses.cs.ut.ee/MTAT.03.246/2014_spring/uploads/Main/bpmn.pdf.
12. Object Management Group Business Process Model and Notation. [Электронный ресурс – 15.12.2014]. <http://www.bpmn.org/>.
13. Turan Y. Extension and Application of Event-driven Process Chain for Information System Security Risk Management. Institute of Computer Science, University of Tartu. Tartu, 2012. 114 с.
14. Chowdhury M. Modeling Security Risks at the System Design Stage. Master in Security and Mobile Computing, 2011.
15. Ковалёв С.М. Выбор бизнес-процессов для оптимизации. // С.М.Ковалёв, В.М.Ковалёв. / "Консультант директора". 2005, № 5 (232) : [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.betec.ru/indexprint.php?id=6&sid=40>
16. Пестунова, Т. М. Оценка рисков информационной безопасности на основе анализа моделей бизнес-процессов /Т. М. Пестунова, М. С. Кондратьев // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2015. № 24. С. 44–51.

УДК 621.372.8: 621.396: 621.315

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СУЩЕСТВЕННЫХ РАСТЯГИВАЮЩИХ СИЛ

И. В. Богачков

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В работе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик натяжения (механических напряжений) в оптических волокнах при больших продольных растягивающих нагрузках на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния. Рассмотрены возникающие в практических испытаниях проблемы. Приведены рефлектограммы, полученные в экспериментах. Представлены графические зависимости бриллюэновского сдвига частоты и натяжения оптических волокон при различных продольных растягивающих силах. В результате проведенного исследования удалось получить рефлектограммы более высокого качества при больших растягивающих нагрузках.

Ключевые слова: бриллюэновская рефлектометрия, оптоволокно, ранняя диагностика, натяжение, бриллюэновский рефлектометр.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для оценки надежности волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) необходимо иметь достоверную информацию о физическом состоянии (натяжении) оптических волокон (ОВ) в проложенных оптических кабелях (ОК).

Различного вида деформации грунта могут вызвать появление механических напряжений в ОВ. Даже незначительные подвижки слоев грунта могут привести к локальным деформациям ОВ в ОК и оказаться фатальными для целостности ОВ в ОК.

При прокладке ВОЛС с использованием подвесной технологии также возникает проблема, связанная с обледенением открытых участков ОК в зимний период. Под весом льда некоторые участки ОК могут деформироваться, что приведёт к появлению повышенных натяжений в ОВ, которые могут значительно сократить срок службы ОВ. Долговечность ОВ зависит от степени его натяжения [1–3].

Обычные оптические импульсные рефлектометры не в состоянии определить участки ОВ, имеющие опасное натяжение. Для обнаружения механически напряженных участков ВОЛС (натяжения ОВ) применяются бриллюэновские оптические рефлектометры (BOTDR).

II. ТЕОРИЯ

Одним из эффективных методов определения степени натяжения ОВ является метод бриллюэновской рефлектометрии [1–3], в основе которого лежит регистрация и последующий анализ спектра вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в ОВ (далее БР – бриллюэновское рассеяние).

Известно [1–7], что обусловленные БР спектральные компоненты обладают тем важным для практических применений свойством, что их частота смещена на величину, пропорциональную степени натяжения волокна.

Продольная растягивающая сила, приложенная к ОВ, изменяет его модуль Юнга, который в свою очередь влияет на изменение скорости гипер акустической волны.

Зондируя ОВ короткими импульсами и сканируя несущую частоту этих импульсов, можно найти распределение спектра бриллюэновского рассеяния (СБР) вдоль ОВ. Анализируя картину распределения СБР в ОВ (значения максимумов СБР), можно определить величину бриллюэновского сдвига частоты (f_B) вдоль ОВ, обнаружить местоположение распределенных нерегулярностей в ОВ и определить степень натяжения ОВ.

В работах [1–2] были рассмотрены вопросы построения математических моделей БР в ОВ и исследовании влияния параметров натяжения ОВ на его спектр.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С целью уточнения моделей, рассмотренных в [1–3], и уточнения результатов ранее проведенных экспериментов [4–6] были проведены экспериментальные исследования ОВ при больших растягивающих нагрузках с BOTDR «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментальных исследований световод был составлен из ОВ нормализующей катушки (ОВ1, G.652 D, длина примерно 1,4 км), сваренного с другим ОВ. (оба ОВ являются одномодовыми). На расстоянии 2 м от места сварки на ОВ1 было сформировано место растяжения.

Участок ОВ1 длиной 5 м был закреплен на блоке так, чтобы растягивающая сила действовала на ОВ1 только в продольном направлении, причем были приняты меры для предотвращения появления изгибов в месте крепления грузов.

Как отмечалось при анализе результатов более ранних экспериментов [4–6], при точечном креплении груза при воздействии продольной растягивающей силы 3 Н и более за местом растяжения существенно падала мощность сигнала. Хотя «проблемный» участок обнаруживался, точность определения характеристик натяжения падала, причем падение мощности сигнала за местом приложения точечной нагрузки делало невозможным получение достоверных рефлектограмм для участков ОВ, находящихся за «проблемным» участком [4–6].

Для устранения указанной проблемы место крепления, на которое подвешивались гири, было сделано распределенным (около 1 м по обе стороны блока) с равномерным сцеплением с ОВ растягиваемого участка.

В результате ОВ получало равномерное натяжение, что позволило получить достоверные результаты даже при существенных растягивающих нагрузках (более 1 кг – сила 10.5 Н).

На рис. 1 представлена картина распределения СБР в ОВ (3D-рефлектограмма) при воздействии растягивающей силы в 5 Н (гири массой в 510 г) при сохранении небольшого поперечного воздействия в месте намотки ОВ1 на катушку.

На рис. 2 показана аналогичная картина после устранения этого мешающего эффекта.

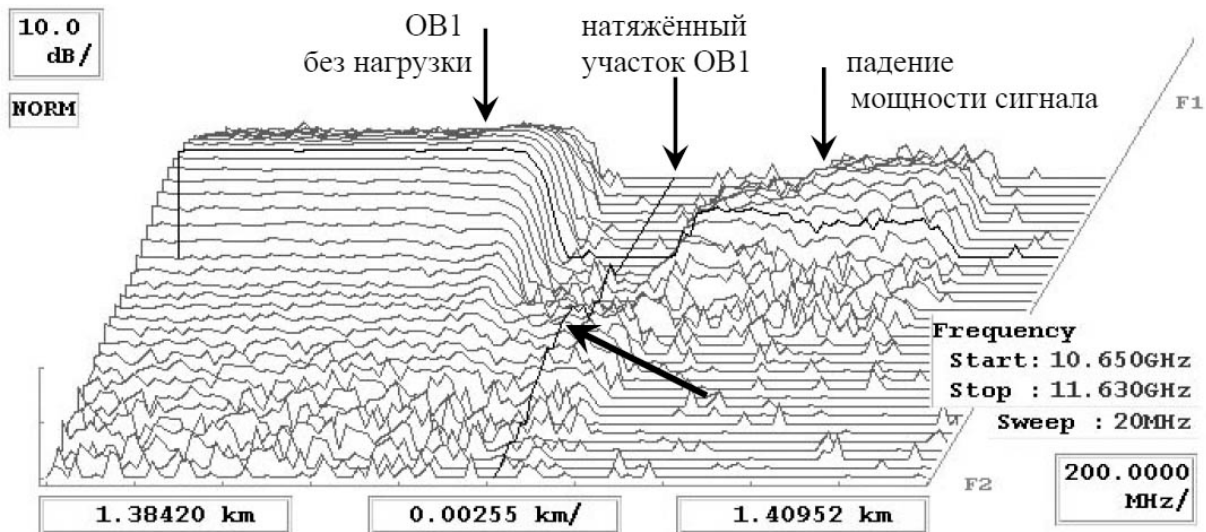


Рис. 1. Картина распределения СБР в ОВ при воздействии растягивающей силы в 5 Н и проявлении асимметрии в месте намотки ОВ1 на катушку

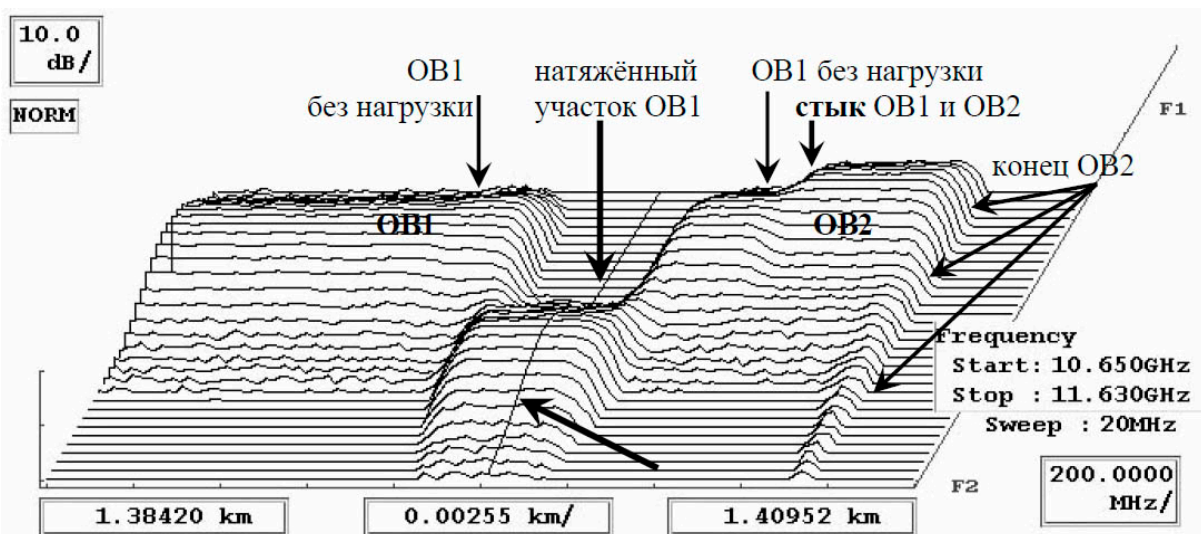


Рис. 2. Картина распределения СБР в ОВ при воздействии растягивающей силы в 5 Н после устранения поперечного смещения ОВ

Анализ рисунков показывает, что во втором случае рефлектограмма получается значительно более чёткой, падение интенсивности сигнала незначительно, и рефлектометр успешно исследует участки ОВ, находящиеся за растягиваемым местом. Например, на рефлектограмме (рис. 2) «проявляются» место стыка волокон ОВ1–ОВ2 и конец линии (конец ОВ2).

На рис. 3 и рис. 4 представлены соответствующие мультирефлектограммы (зависимости по длине световода натяжения (Strain), СБР, ширины СБР (B.S.W) и потерь (Loss)). Очевидно, что на рис. 4 все зависимости получились чёткими по сравнению с рис. 3 (расширение СБР (B.S.W) и увеличение потерь существенно снижают точность анализа [1, 2]).

Смещение пика СБР (f_B) при растяжении ОВ показано стрелкой.

Следует отметить, что в данном эксперименте удалось добиться практически ровного графика в месте растяжения, в то время как в подобных графиках, полученных в других экспериментах [4–], наблюдаются заметные неравномерности и колебания в растягиваемых местах (подобно графику натяжения на рис. 3).

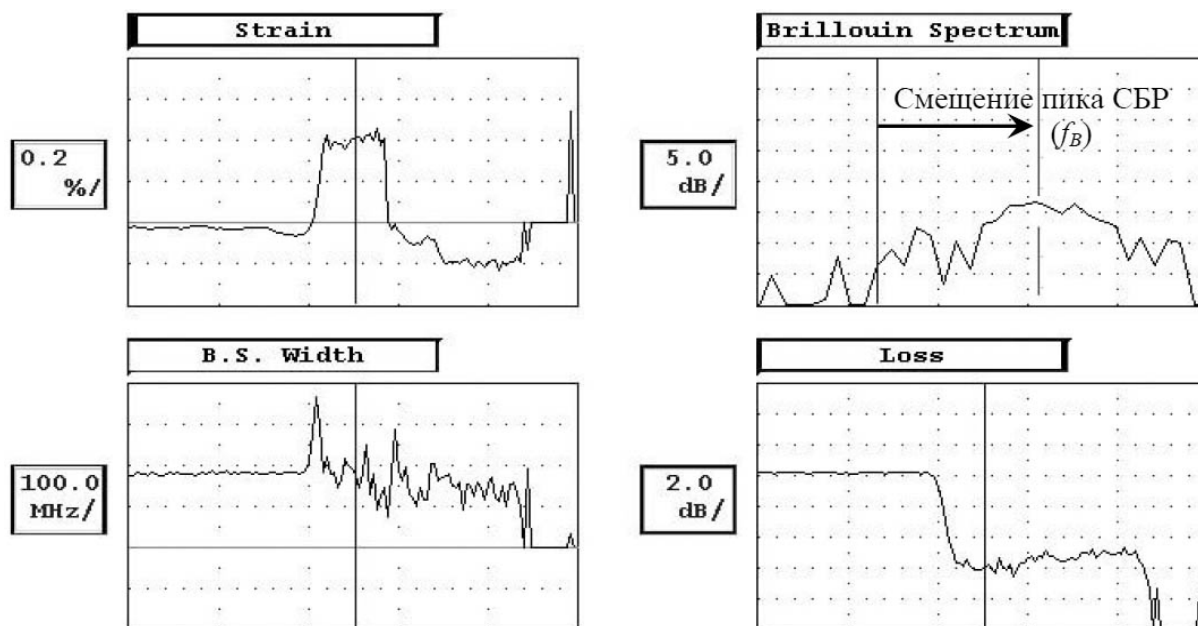


Рис. 3. Мультирефлектограмма ОВ при воздействии растягивающей силы в 5 Н и проявлении асимметрии в месте намотки ОВ1 на катушку

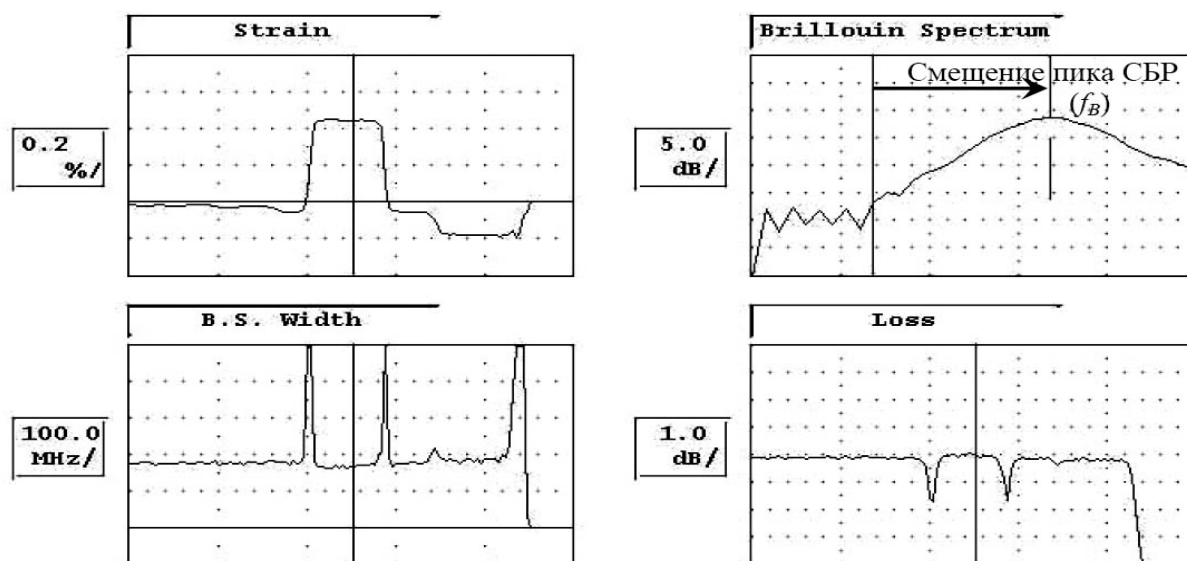


Рис. 4. Мультирефлектограмма ОВ при воздействии растягивающей силы в 5 Н после устранения поперечного смещения ОВ

При дальнейшем увеличении нагрузки удалось получить характеристики ОВ даже при растягивающей силе в 10.5 Н.

На рис. 5 представлена картина распределения СБР в ОВ при воздействии продольной растягивающей силы в 10.5 Н.

На рис. 6 приведена соответствующая мультирефлектограмма, а на рис. 7 – развернутая рефлектограмма натяжения в области «проблемной» секции.

В данном эксперименте при изменении продольной растягивающей силы от 0 до 10.5 Н наблюдалось смещение пика СБР от 10.83 ГГц до 11.40 ГГц.

Наблюдалась линейная зависимость.

Соответственно, натяжение изменилось от -0.062% до 1.02%, при этом ОВ удлинялось на 53 мм (при растягивающей силе в 10,5 Н).

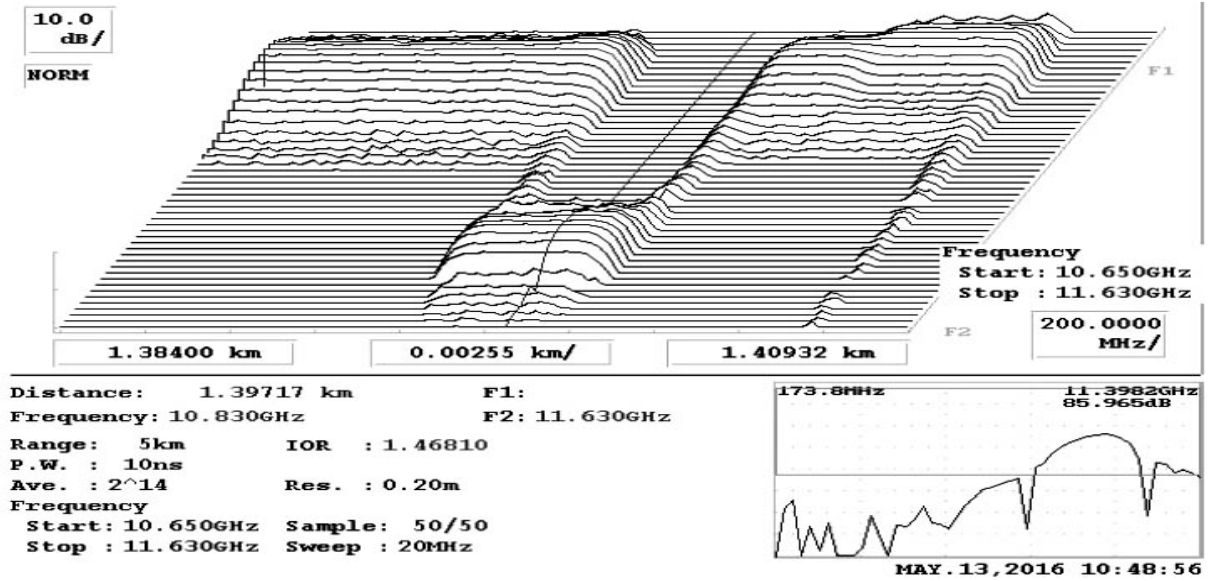


Рис. 5. Картина распределения СБР в ОВ при воздействии продольной растягивающей силы в 10.5 Н

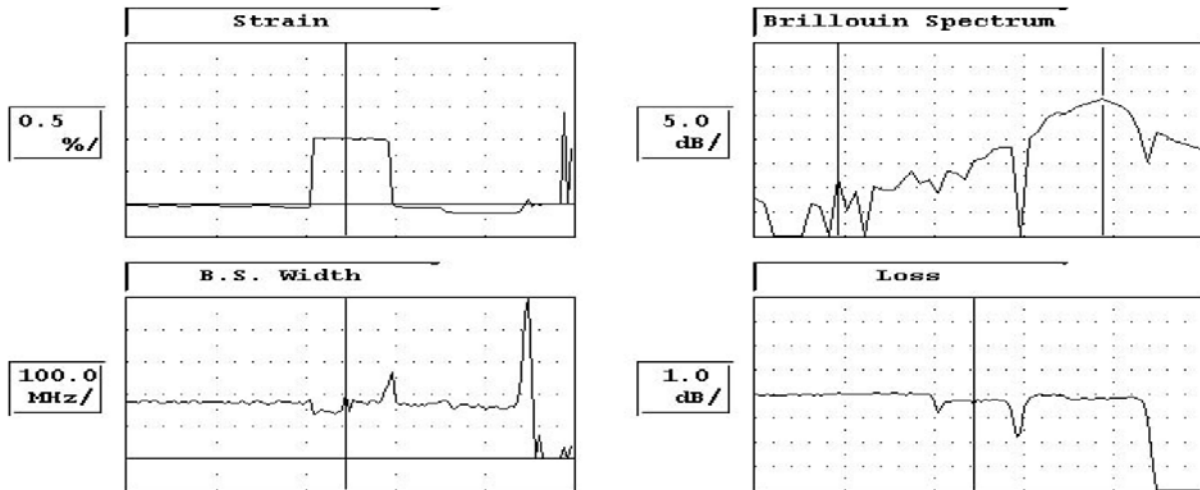


Рис. 6. Мультирефлектограмма ОВ при воздействии продольной растягивающей силы в 10.5 Н

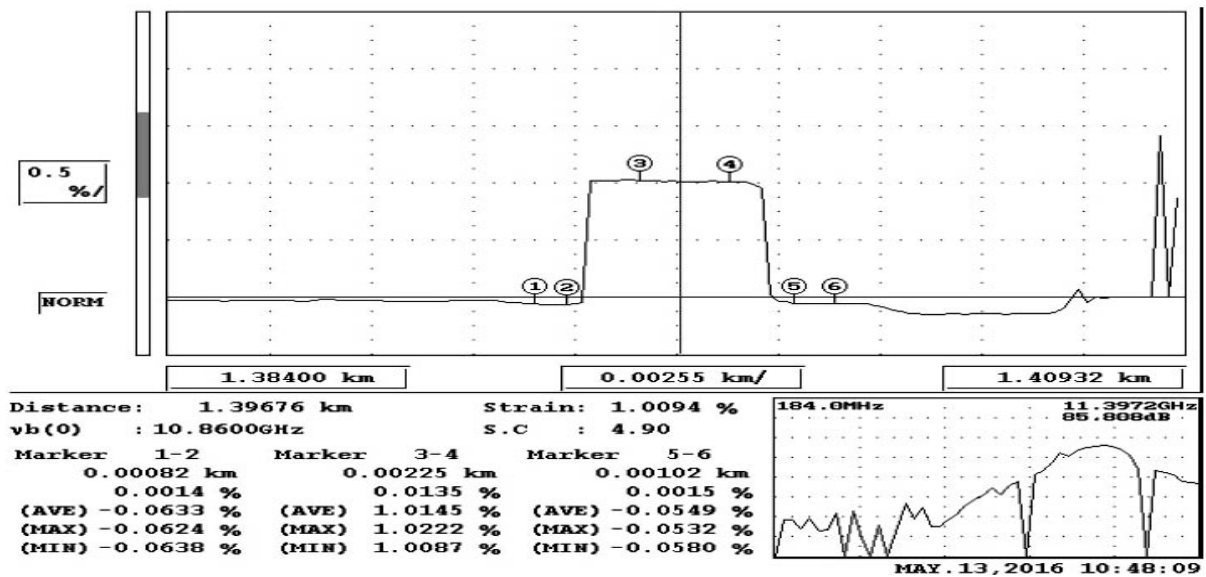


Рис. 7. Зависимость натяжения ОВ в области растягиваемого участка (сила в 10.5 Н).

Превышение потенциально опасного уровня натяжения в 0,2% наблюдалось при растягивающей силе в 3 Н.

В. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтвердили возможность обнаружения механически напряженных участков и оценки степени натяжения ОВ на основании анализа СБР при различных растягивающих нагрузках.

В результате проведенных исследований были получены уточненные характеристики натяжения ОВ при больших растягивающих нагрузках. Устранение влияния асимметричных (поперечных) воздействий позволяет улучшить качество рефлектограмм за местом крепления растягивающих грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богачков И. В., Горлов Н. И. Проектирование, строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий передачи: учеб. пособие: в 5 ч. Ч. 5. Техническая эксплуатация волоконно-оптических линий передачи. Омск: ОмГТУ, 2015. 208 с.
2. Bogachkov I. V., Ovchinnikov S. V., Maistrenko V. A. Applying of Brillouin Scattering Spectrum Analysis for Detection of Distributed Irregularities in Optic Fibers and Estimation of Irregularities Parameters // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2013. Proceedings. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013. P. 1–3.
3. Bogachkov I.V., Maistrenko V. A. The Modeling of the Brillouin Backscattering for Searching of Mechanical Strained Places in Optical Fibers // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. P. 1–5.
4. Bogachkov I.V. Researching of Influence of the Strain Degree of Optical Fibers on the Brillouin Backscattering Characteristics // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk, 2015. P. 1–6.
5. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Experimental Examination of the Strain Characteristics of Optical Fibers // IEEE 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. 2014. V. 1. P. 223–227.
6. Bogachkov I. V., Maistrenko V. A. Experimental examinations of changes influence of the Brillouin backscattering spectrum in optical fibers on their characteristics // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014 – Proceedings. 2014. P. 1–10.
7. Акопов С. Г., Васильев Н. А., Поляков М. А. Использование бриллюэновского рефлектометра при испытаниях оптического кабеля на растяжение // Lightwave. 2006. №1. С. 23–25.

УДК 621.372.8: 621.396: 621.315

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ С НЕНУЛЕВОЙ СМЕЩЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ ПРИ ПРОДОЛЬНЫМ РАСТЯГИВАЮЩИМ СИЛАМ

И. В. Богачков

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В работе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик натяжения (механических напряжений) в оптических волокнах с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF) при различных продольных растягивающих нагрузках на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния.

Приведены рефлектограммы NZDSF, полученные в экспериментах. Представлены графические зависимости бриллюэновского сдвига частоты и натяжения NZDSF при различных продольных растягивающих силах. Показано, что в спектре бриллюэновского рассеяния в NZDSF проявляются побочные максимумы.

В результате сравнительного анализа характеристик оптических волокон различных видов было выявлено, что характеристики натяжения NZDSF занимают промежуточное положение между зависимостями обычного оптоволокна и оптического волокна со смещенной дисперсией.

Ключевые слова: бриллюэновская рефлектометрия, бриллюэновское рассеяние, натяжение, оптоволокно с ненулевой смещенной дисперсией.

I. ВВЕДЕНИЕ

В протяженных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) нашли распространение оптические волокна (ОВ) со смещённой дисперсией (DSF – dispersion-shifted single mode fiber – G.653).

В этих ОВ частотная характеристика дисперсии смещена так, что минимальная («нулевая») дисперсия попадает в «окно» $\lambda = 1550$ нм [1–5].

Однако известно, что применение этих ОВ в оптоволоконных системах со спектральным уплотнением (WDM – Wavelength Division Multiplexing) натолкнулось на трудности, связанные с появлением нелинейных эффектов, таких как четырехволновое смешение (Four-wave mixing).

Это привело к появлению ОВ с ненулевой смещённой дисперсией (NZDSF – non zero dispersion-shifted single mode fiber – G.655), оптимизированных именно для протяженных WDM-систем [1–4].

Для оценки надежности ВОЛС необходимо иметь достоверную и своевременную информацию о натяжении ОВ в оптическом кабеле (ОК). С этой задачей обычные оптические импульсные рефлектометры не справляются. Для решения этой задачи применяются бриллюэновские рефлектометры (BOTDR – Brillouin optical time-domain reflectometers), которые измеряют оптические свойства ОВ и на их основе позволяют прогнозировать обрыв ОВ [3, 5, 9].

Поскольку при работе BOTDR уровни мощности сигнала, вводимого в ОВ, значительны и в ОВ проявляются нелинейные эффекты, представляет особый интерес анализ спектра бриллюэновского рассеяния (СБР) и определение характеристик механически напряженных участков ОВ с различными законами поведения дисперсии.

II. ТЕОРИЯ

Одним из эффективных методов определения степени натяжения ОВ является метод бриллюэновской рефлектометрии в основанный на анализе спектра вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (далее бриллюэновское рассеяние – БР) в ОВ [3 – 6]. Продольная растягивающая сила, приложенная к ОВ, изменяет его модуль Юнга, что приводит к соответствующему смещению СБР. Зондируя ОВ короткими импульсами и сканируя несущую частоту этих импульсов, можно найти распределение СБР вдоль ОВ. Анализируя картину распределения СБР в ОВ (значения максимумов СБР), можно определить величину бриллюэновского сдвига частоты (f_B) вдоль ОВ, а после этого найти и распределение натяжения вдоль ОВ [3–7].

В работах [5–7] были приведены результаты экспериментальных исследований БР в обычных ОВ и DSF, определены характеристики натяжения ОВ.

На рис. 1 приведён профиль СБР для обычного одномодового ОВ (G.652D).

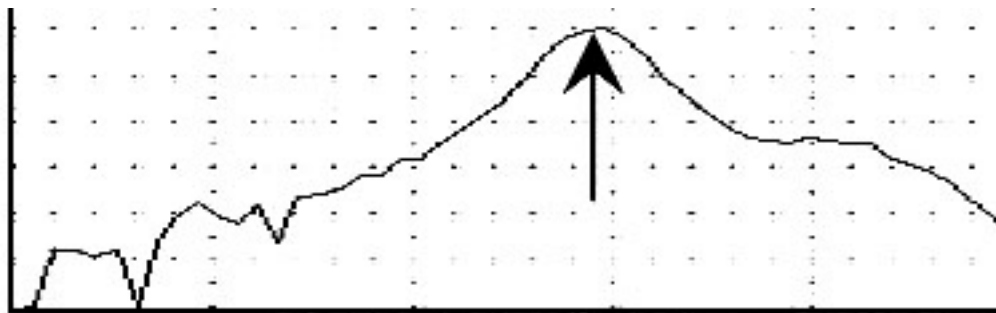


Рис. 1. Профиль СБР для обычного одномодового ОВ (G.652D)

Максимум СБР отмечен стрелкой. На рис. 2 приведён профиль СБР для DSF (G.653).

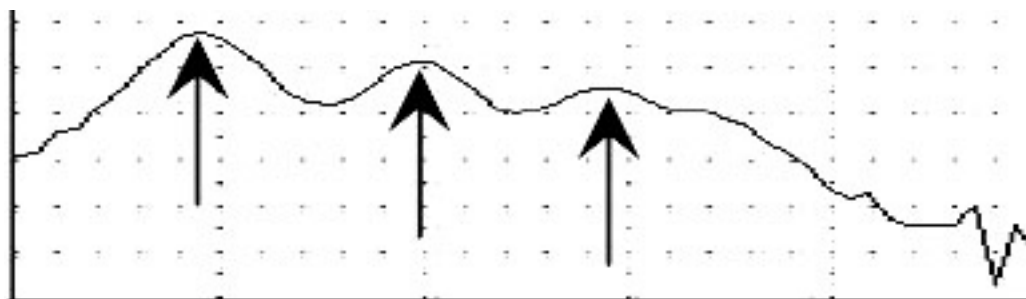


Рис. 2. Профиль СБР для DSF (G.653)

Как видно из рис. 2, профиль СБР имеет 3 максимума («горба» на графике). Для оценки натяжения при обычной процедуре анализа используется первый максимум [8].

Поскольку NZDSF имеет особые свойства, представляет интерес исследование поведения СБР и определение характеристик натяжения в ОВ этого типа.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С целью уточнения моделей и изучения особенностей БР в ОВ с ненулевой смещённой дисперсией (NZDSF) были проведены экспериментальные исследования с BOTDR «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментальных исследований световод был составлен из ОВ нормализующей катушки ОВ1 (G.652 D, длина 1393 м), соединённого сваркой с ОВ2 – NZDSF (G.655, длина 7 м), которое в свою очередь соединено с ОВ3 (G.657). Все ОВ являются одномодовыми. На расстоянии 2 м от места сварки на NZDSF было сформировано место растяжения, на которое подвешивались гири от 10 г до 600 г.

Эффекты асимметрии (поперечного воздействия) в местах растяжения при точечном креплении груза приводят к микроизгибам, что вызывает существенное падение интенсивности сигнала за местом растяжения. Эти проблемы были обсуждены при анализе результатов более ранних экспериментов [5–, 9, 10].

Для устранения указанных эффектов участок NZDSF (ОВ2) длиной 5 м был закреплен на блоке так, чтобы растягивающая сила действовала на NZDSF только в продольном направлении, причем были приняты меры для предотвращения появления изгибов в месте крепления грузов. Место крепления, на которое подвешивались гири, было сделано распределенным (около 1 м по обе стороны блока) с равномерным сцеплением с ОВ растягиваемого участка. В результате ОВ получало равномерное натяжение, и падения мощности сигнала за местом растяжения не наблюдалось.

На рис. 3 представлена картина распределения СБР в световоде (3D-рефлектограмма) при воздействии на NZDSF продольной растягивающей силы в 1 Н.

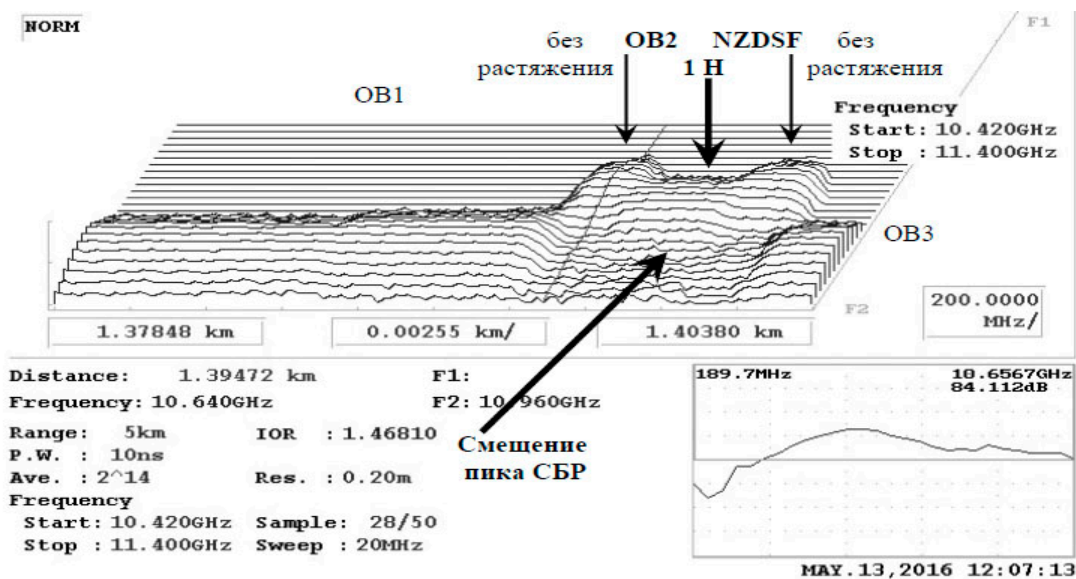


Рис. 3. Картина СБР для NZDSF (G.655) при продольной растягивающей силе в 1 Н

Смещение СБР в месте растяжения NZDSF отмечено крупными стрелками, участки NZDSF без растяжения отмечены меньшими стрелками.

Максимум СБР при отсутствии растяжения наблюдается на частоте 10.61 ГГц. На растягиваемом участке NZDSF при силе в 1 Н пик СБР (f_B) смещается на частоту 10.71 ГГц

Рассмотрим подробнее профиль СБР NZDSF, показанный на рис. 4.

По сравнению с профилями ОВ, приведёнными на рис. 1 и рис. 2, кроме главного максимума (обозначен крупной стрелкой), который наблюдается у G.652D на рис. 1, наблюдаются дополнительные малые пики (по 2 с каждой стороны от главного – отмечены меньшими стрелками), хотя и не столь явно выраженные, как у DSF (рис. 2).

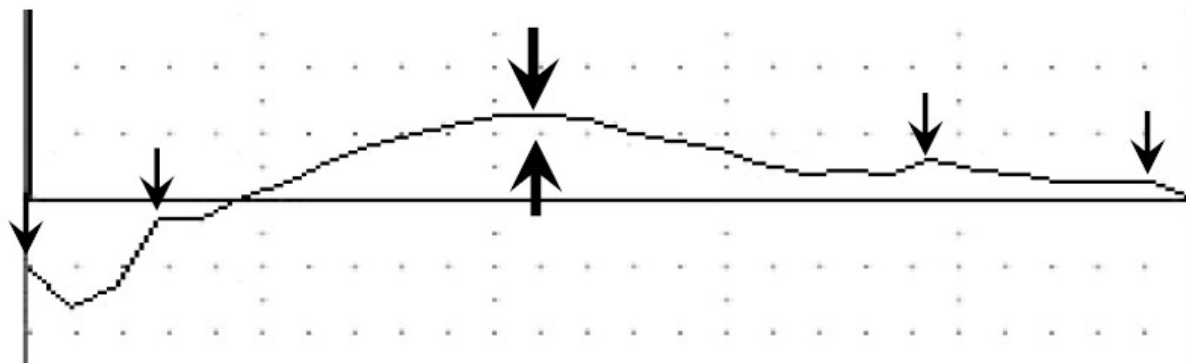


Рис. 4. Профиль СБР для NZDSF (G.655)

На рис. 5 приведена соответствующая распределению СБР на рис. 3 мультирефлектограмма (зависимости по длине световода натяжения (Strain), СБР, ширины СБР (B.S.W) и потерь (Loss)) при продольной растягивающей силы в 1 Н.

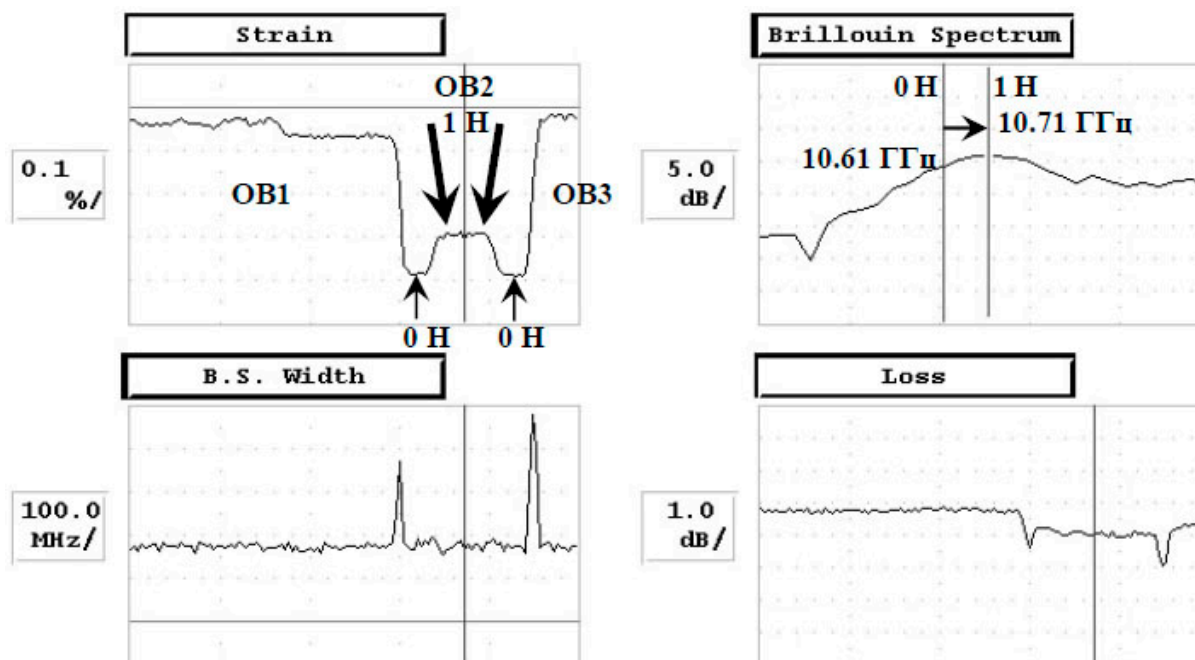


Рис. 5. Мультирефлектограмма для NZDSF (G.655) при продольной растягивающей силе в 1 Н

Характерные участки мультирефлектограммы отмечены стрелками.

При значительных растягивающих силах NZDSF проявляет большую чувствительность к нелинейным эффектам, чем обычное ОВ (G.652D), но меньше, чем DSF (G.653).

На рис. 6 приведена картина распределения СБР в световоде (3D-рефлектограмма) при воздействии на NZDSF продольной растягивающей силы в 6 Н.

На рис. 7 представлена соответствующая мультирефлектограмма. Сравнивая графики на рис. 5 и рис. 7, можно отметить, что в «проблемных» местах спектр БР расширяется, затухание увеличивается и появляется «изрезанность» графиков.

На растягиваемом участке NZDSF при силе в 6 Н пик СБР (f_B) смещается на частоту 10.96 ГГц

Анализ натяжения NZDSF приводит к таким результатам.

NZDSF при нормальных условиях (без растяжения и при комнатной температуре) имеет отрицательное натяжение -0.39% .

При этом при тех же условиях натяжение ОВ1 составляет -0.06% (максимум СБР находится на частоте 10.83 ГГц).

При воздействии на NZDSF продольной растягивающей силы натяжение увеличивается до -0.29% при силе в 1 Н, а при силе в 6 Н достигает значения $+0.21\%$ (при этом на растягиваемом участке NZDSF удлинилось на 30 мм относительно исходного значения).

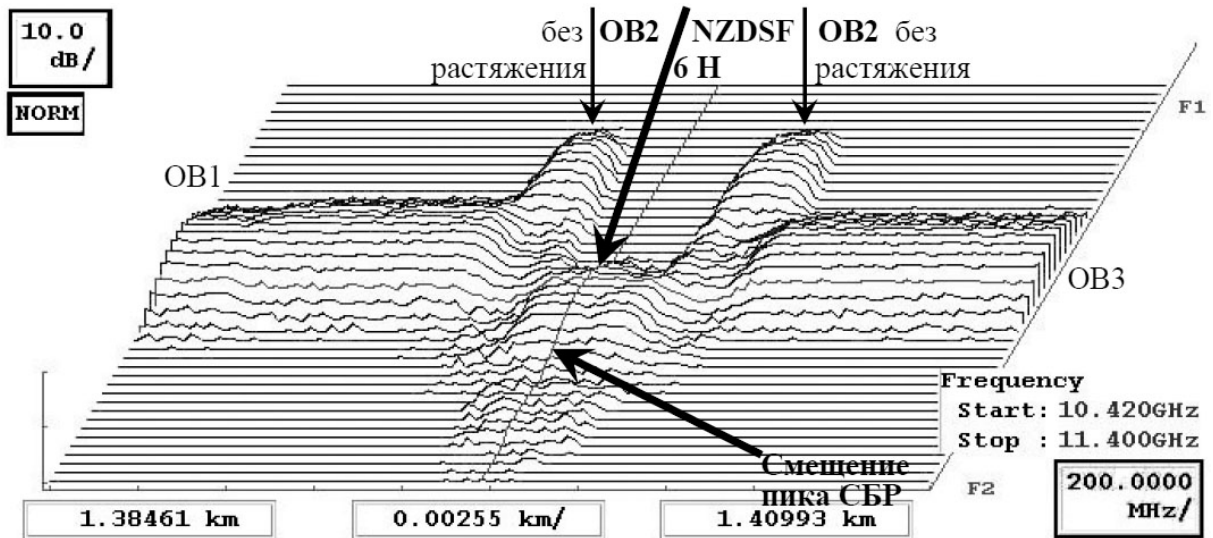


Рис. 6. Картина распределения СБР для NZDSF (G.655) при продольной растягивающей силе в 6 Н

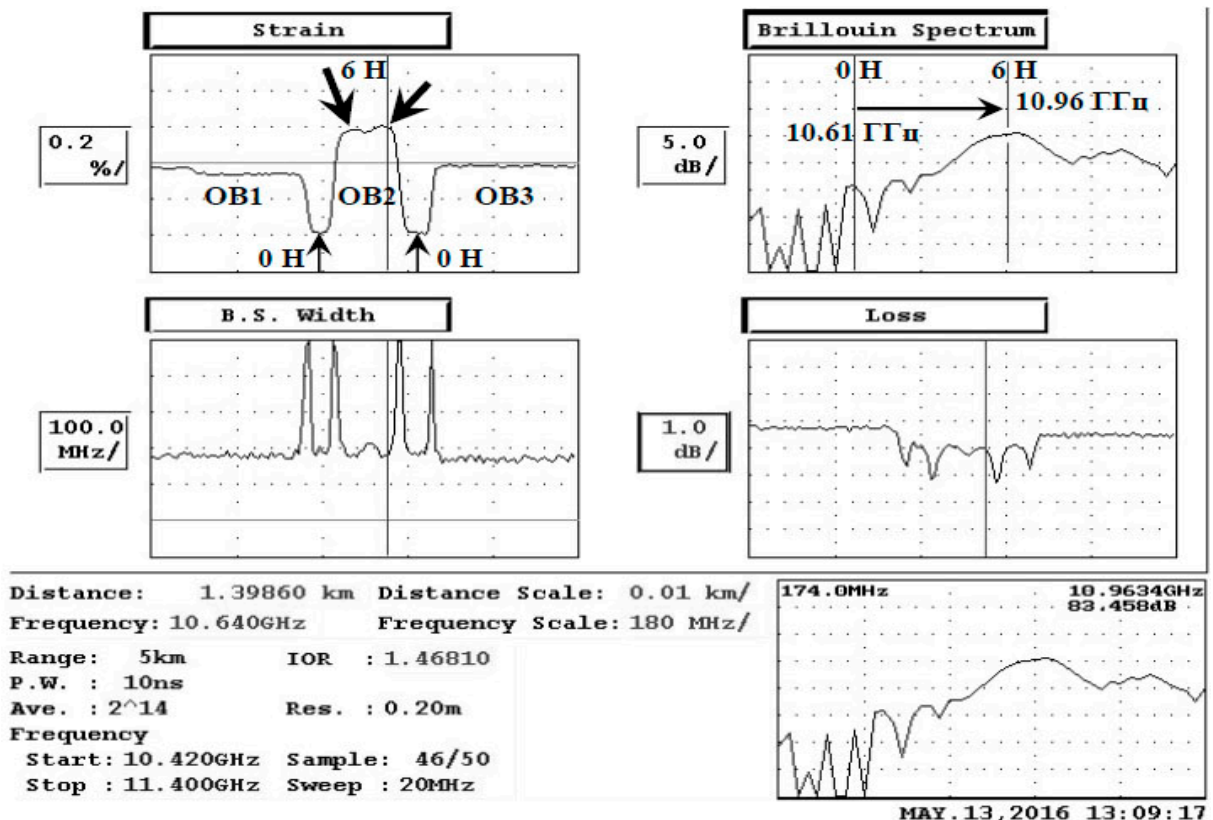


Рис. 7. Мультирефлектограмма для NZDSF (G.655) при продольной растягивающей силе в 6 Н

Как следует из экспериментов с DSF [5–7], натяжение DSF при нормальных условиях (при комнатной температуре без растяжения) имеет ещё большее смещение СБР в сторону меньших частот и при оценке по первому максимуму – ещё большее смещение натяжения в отрицательную область по сравнению с NZDSF (на $0,4\%$ относительно NZDSF и на $0,8\%$ относительно OB G.652D).

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтвердили возможность обнаружения механически напряженных (натяжённых) участков и оценки степени натяжения NZDSF (G.655) на основании анализа СБР в нём.

Оказалось, что NZDSF по характеристикам СБР и натяжения занимает промежуточное положение между обычными ОВ (G.652D) и DSF (G.653).

При нормальных условиях при обычной методике анализа для NZDSF получается отрицательное натяжение, хотя и существенно меньшее, чем для DSF (G.653).

При изменениях продольных растягивающих нагрузок наблюдается линейная зависимость, смещённая вниз относительно обычного ОВ на 0.4%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы: сб. ст. / под ред. С. А. Дмитриева, Н. Н. Слепова. М.: Техносфера, 2010. 608 с.
2. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 288 с.
3. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон связи. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
4. Агравал Г. Применение нелинейной волоконной оптики. СПб.: Лань, 2011. 592 с.
5. Bogachkov I. V. Researching of Influence of the Strain Degree of Optical Fibers on the Brillouin Backscattering Characteristics // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2015. Omsk, 2015. P. 1–6.
6. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Experimental Examination of the Brillouin Backscattering Spectrum in Dispersion-Shifted Optical Fibers, IEEE 2014 // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. 2014. V. 1. P. 195–200.
7. Bogachkov I. V. Researching of features of the Brillouin Backscattering Spectrum in Dispersion-Shifted Optical Fibers // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2016. M., 2016. P. 1–6.
8. AQ 8603. Optical fiber strain analyzer. Instruction manual AS-62577. Japan, Ando Electric Co Ltd, 2001. 190 p.
9. Акопов С. Г., Васильев Н. А., Поляков М. А. Использование бриллюэновского рефлектометра при испытаниях оптического кабеля на растяжение // Lightwave. 2006. № 1. С. 23–25.
10. Belal M., Newson T. P. Experimental Examination of the Variation of the Spontaneous Brillouin Power and Frequency Coefficients Under the Combined Influence of Temperature and Strain // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30, no. 8. P. 1250–1255.

УДК 621.372.8: 621.396: 621.315

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СПЕКТРА БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ

И. В. Богачков

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры на характеристики спектра бриллюэновского рассеяния и натяжение одномодовых оптических волокон различных видов. Приведены рефлектограммы и графические зависимости для следующих разновидностей оптических волокон: G.652, G.653, G.655, G.657, – полученные при экспериментальных исследованиях.

В результате анализа спектра бриллюэновского рассеяния были построены температурные зависимости для различных видов оптических волокон. Для всех видов волокон, рассмотренных в работе, наблюдалась линейная зависимость бриллюэновского частотного сдвига и соответствующих температурных характеристик натяжения.

Анализ результатов экспериментов показал, что температурные зависимости бриллюэновского смещения частоты и натяжения для волокон со смещённой дисперсией (G.653) и ненулевой смещённой дисперсией (G.655) существенно смещены вниз относительно зависимостей для обычных волокон (G.652). Характеристики волокон G.657 и G.652 различаются незначительно.

Ключевые слова: бриллюэновская рефлектометрия, бриллюэновское рассеяние, оптоволокно, дисперсия, ранняя диагностика.

I. ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей мониторинга и ранней диагностики волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является получение достоверной информации о физическом состоянии оптических волокон (ОВ), находящихся в проложенных оптических кабелях (ОК) [1–4].

Температурные изменения в ОВ могут сигнализировать о появлении «проблемного» участка на трассе прокладки ВОЛС.

Например, повышение температуры участка ВОЛС может наблюдаться при прорыве теплотрассы в месте прокладки ОК, а в зимнее время может наблюдаться понижение температуры участка ВОЛС при появлении трещин в почве или иных разрушений на трассе прокладки ОК.

Своевременное обнаружение такого участка позволяет принять необходимые меры по устранению аварии до разрушения ВОЛС.

Обычные оптические импульсные рефлектометры не в состоянии своевременно определить опасные изменения натяжения и температуры ОВ. Для решения этих задач необходимо применять метод бриллюэновской рефлектометрии.

II. ТЕОРИЯ

Для определения натяжения и температуры ОВ весьма эффективным является метод бриллюэновской рефлектометрии. В его основу положен анализ спектра вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (далее БР – бриллюэновское рассеяние) в ОВ [2–6]. Спектральные компоненты БР света в ОВ обладают тем важным для практических применений свойством, что их частота смещена на величину, пропорциональную степени натяжения и температуре волокна [2, 6].

БР приводит к образованию обратной волны в ОВ. Зондируя ОВ короткими импульсами и сканируя несущую частоту этих импульсов, можно найти распределение спектра бриллюэновского рассеяния (СБР) вдоль ОВ. Анализируя положение максимумов СБР в ОВ, можно определить характеристики натяжения вдоль ОВ [2–5].

Связь бриллюэновского смещения частоты (Δf_B) температурой (t°) ОВ характеризуется линейной зависимостью [5–8]:

$$\Delta f_B(t^\circ) = f_B(t^\circ) - f_{B0} = C_t^\varepsilon \cdot (t^\circ - t_0),$$

где C_t^ε – коэффициент линеаризации, зависящий от длины волны и модуля Юнга, $f_B(t^\circ)$ – частота максимума СБР, t_0 – начальная температура (например, типичная комнатная температура), $f_{B0} = f_B(t_0)$.

Поскольку оптические волокна различных видов могут иметь существенные различия в поведении характеристик СБР и натяжения [6 – 10], представляет особый интерес исследование этих характеристик при изменениях температуры.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С целью уточнения моделей и изучения особенностей температурных зависимостей БР в ОВ с различными законами поведения дисперсии были проведены экспериментальные исследования с BOTDR «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментальных исследований световод был составлен из ОВ нормализующей катушки ОВ1 (G.652, длина 144 м), соединённого сваркой с ОВ2 – NZDSF (G.657, длина 6 м), которое, в свою очередь, соединено с ОВ3 (ОВ G.657 диаметром 200 мкм с уменьшенной толщиной защитной оболочки, длина 7 м). Места стыков ОВ (сварных соединений) на рис. 1–8 обозначены сплошными стрелками.

Для более заметного выделения эффектов изменения температуры только петли волокон в области стыков (1 м ОВ1, 3 м ОВ2 и 5 м ОВ3) помещались в камеру нагрева и, затем, охлаждения.

Сами стыки волокон «1–2» и «2–3» оставались вне камеры нагрева при комнатной температуре (+25 °С).

На рис. 1 представлена картина СБР (3D-рефлектограмма – функция распределения интенсивности отраженного сигнала по длине световода и бриллюэновского сдвига частоты (f_B)) при нагреве участков до +90 °С.

«Полосатыми» стрелками на рис. 1–8 отмечены участки, помещённые в камеру нагрева. Профили СБР ОВ2 и ОВ3 на нагретых участках отмечены штриховыми линиями.

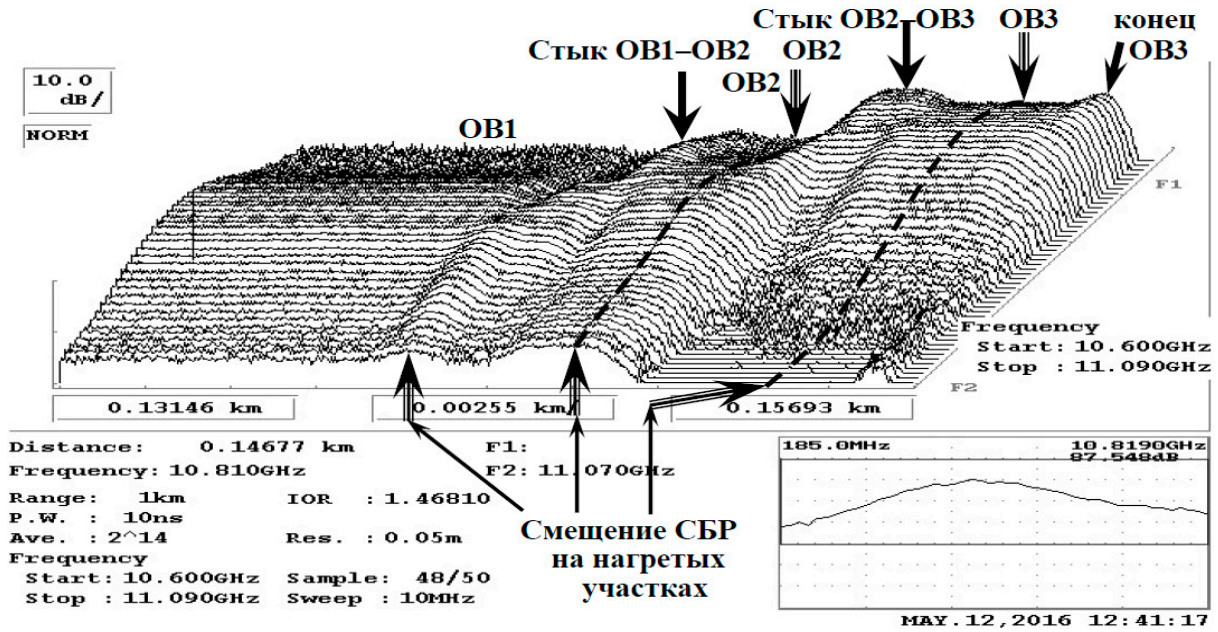


Рис. 1. Картина СБР в световоде при нагреве участков до +90 °С

Как видно из рис. 1, картина СБР на нагретых участках изменилась – максимум СБР сместился по оси частот в сторону увеличения частоты (F2).

На рис. 2 представлена картина СБР тех же участков OB2 и OB3 при их охлаждении до -10 °С (OB1 в камеру охлаждения не помещалось). Графики при охлаждении OB G.652 можно увидеть в работах [6, 8]).

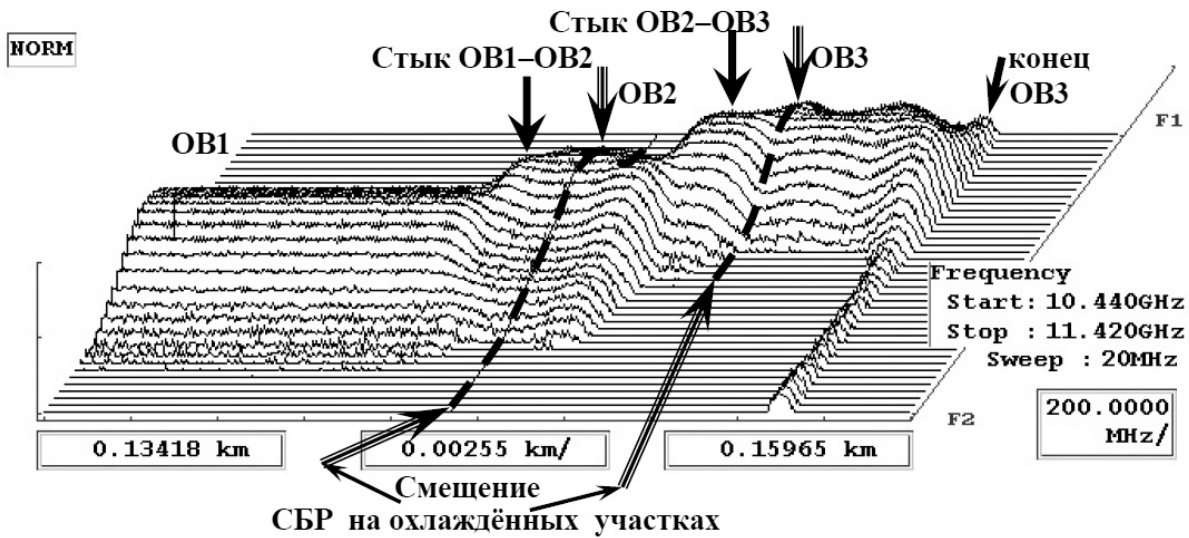


Рис. 2. Картина СБР в световоде при охлаждении участков OB2 и OB3 до -10 °С

Из рис. 2 видно, что максимум СБР на охлаждённых участках сместился по оси частот в сторону уменьшения частоты (F1).

На рис. 3 и 4 приведены соответствующие картинам распределений СБР на рис. 1 и 2 мультирефлектограммы (зависимости по длине световода натяжения (Strain), СБР, ширины СБР (B.S.W) и потерь (Loss)).

На рефлектограммах хорошо заметны характерные изменения на участках, температура которых изменена.

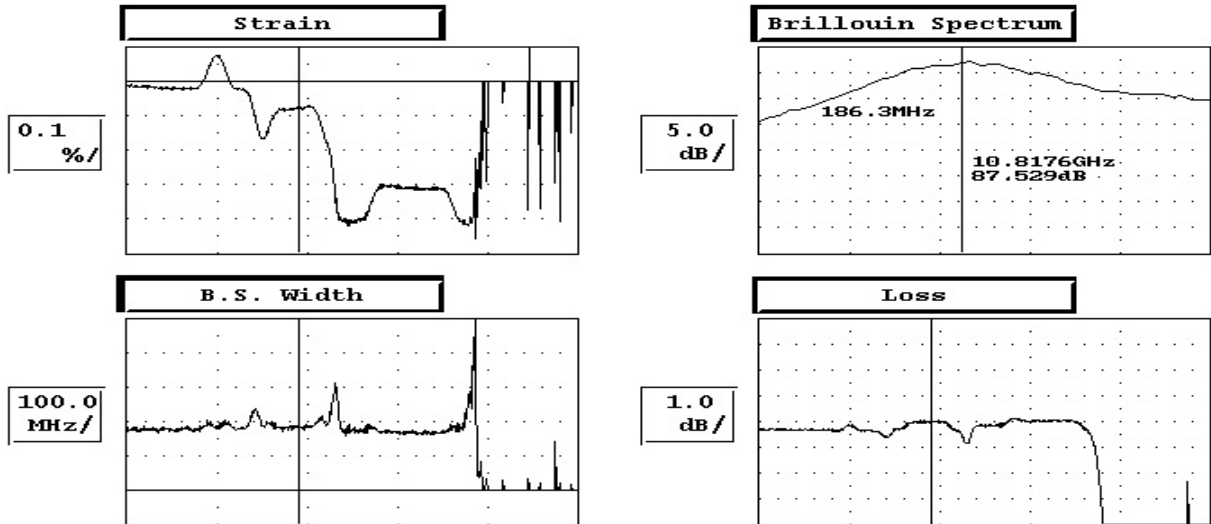


Рис. 3. Мультирефлектограмма световода при нагреве участков до +90 °С

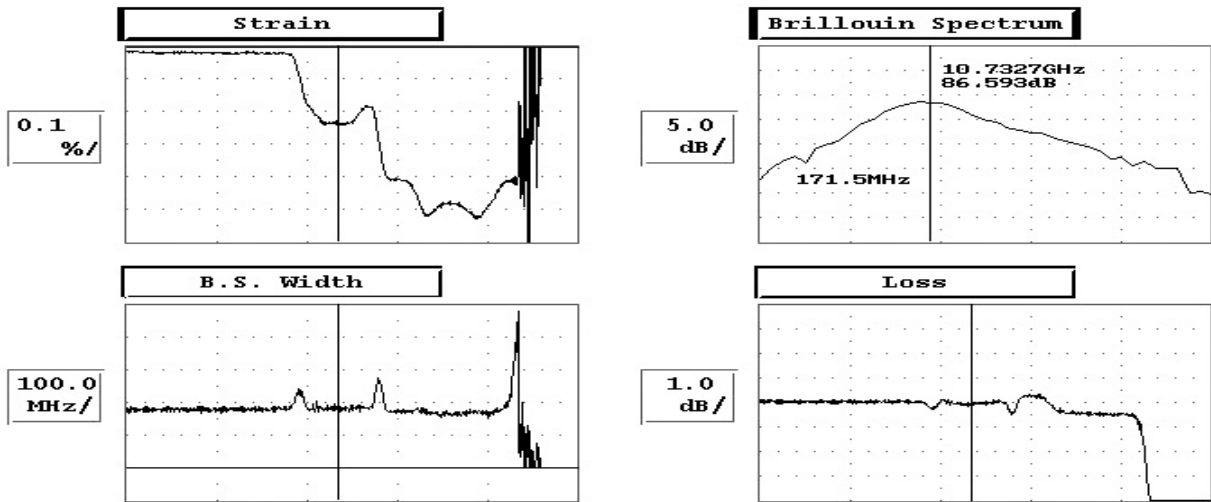


Рис. 4. Мультирефлектограмма световода при охлаждении участков OB2 и OB3 до -10 °С

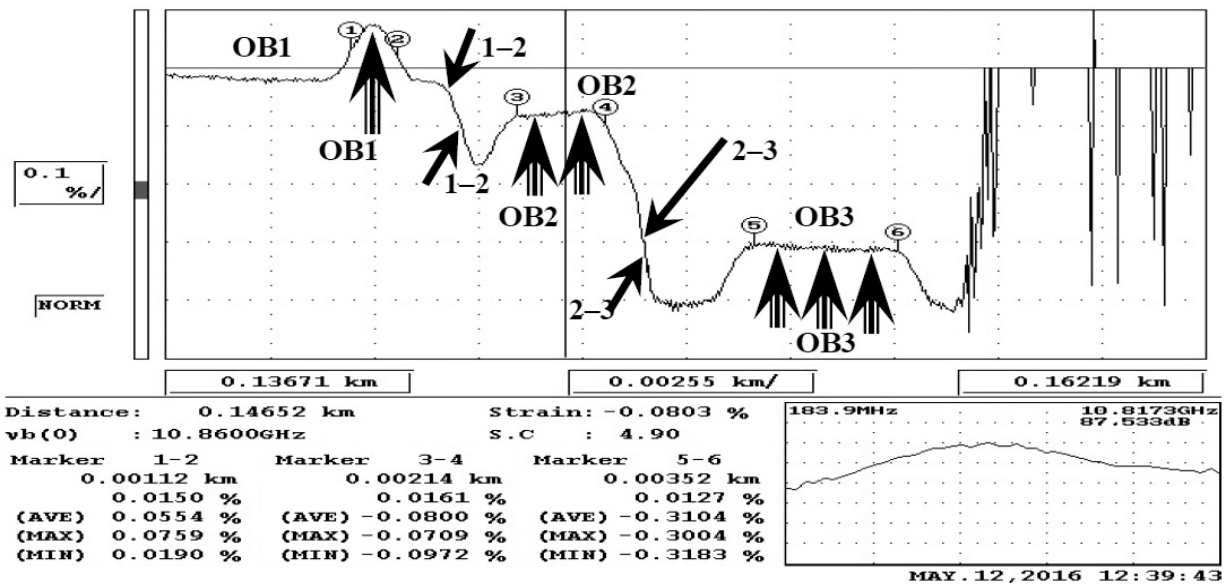


Рис. 5. Зависимость натяжения волокон при нагреве участков до +90 °С

На рис. 5 и рис. 6 приведены соответствующие картинам распределений СБР на рис. 1 ирис. 2развёрнутые рефлектограммы натяжения (Strain) вдоль световода.

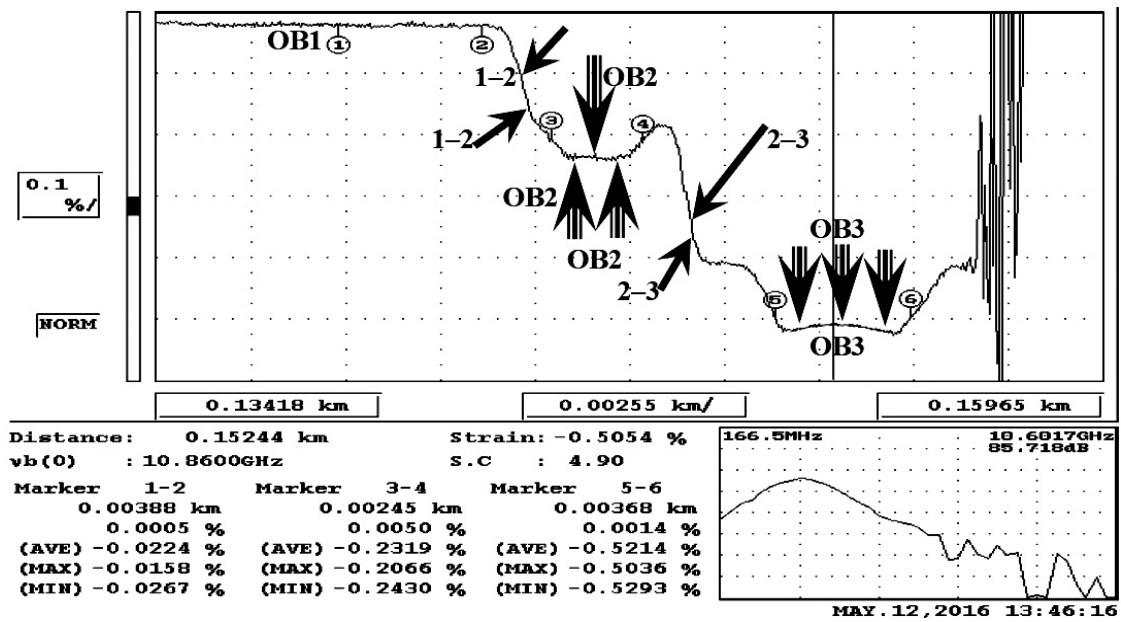


Рис. 6. Зависимость натяжения волокон при охлаждении участков OB2 и OB3 до -10 °С

Характерные изменения в рефлектограммах (стыки волокон, участки с изменённой температурой) отмечены стрелками соответствующих видов.

Во втором эксперименте световод был составлен из ОВ нормализующей катушки OB1 (G.652, длина 144 м), соединённого сваркой с OB2 (G.655 – NZDSF – ОВ с ненулевой смещённой дисперсией – non zero dispersion-shifted single mode fiber, длина 11 м), которое, в свою очередь, соединено с OB3 (G.657, длина 5 м).

Полученная в этом эксперименте картина СБР по длине световода представлена на рис. 7. Профиль СБР NZDSF на нагретом участке отмечен штриховыми линиями.

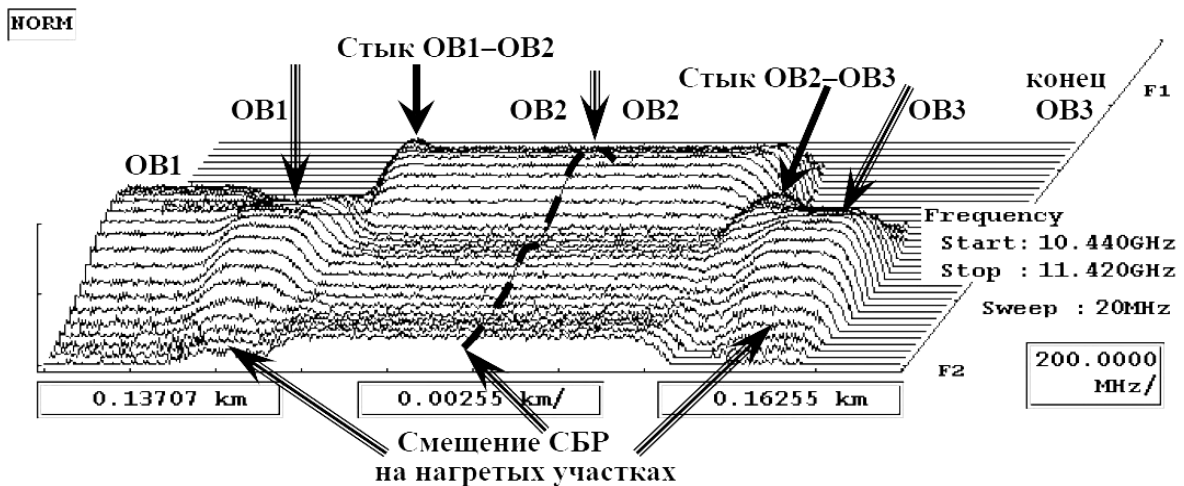


Рис. 7. СБР (f_B) для различных видов ОВ

Для более заметного выделения эффектов изменения температуры только петли волокон в области стыков (2 м OB1, 9,5 м OB2–NZDSF и 3 м OB3) помещались в камеру нагрева и, затем, охлаждения. Сами стыки волокон «1–2» и «2–3» оставались вне камеры нагрева при комнатной температуре (+25 °С).

Места стыков ОВ (сварных соединений) на рис. 7 и 8 обозначены сплошными стрелками. Изменения рефлектограмм на нагретых участках (помещённые в камеру нагрева) отмечены «полосатыми» стрелками.

На рис. 8 приведена развёрнутая рефлектограмма натяжения вдоль световода, соответствующая картине распределений СБР, показанной на рис. 7.

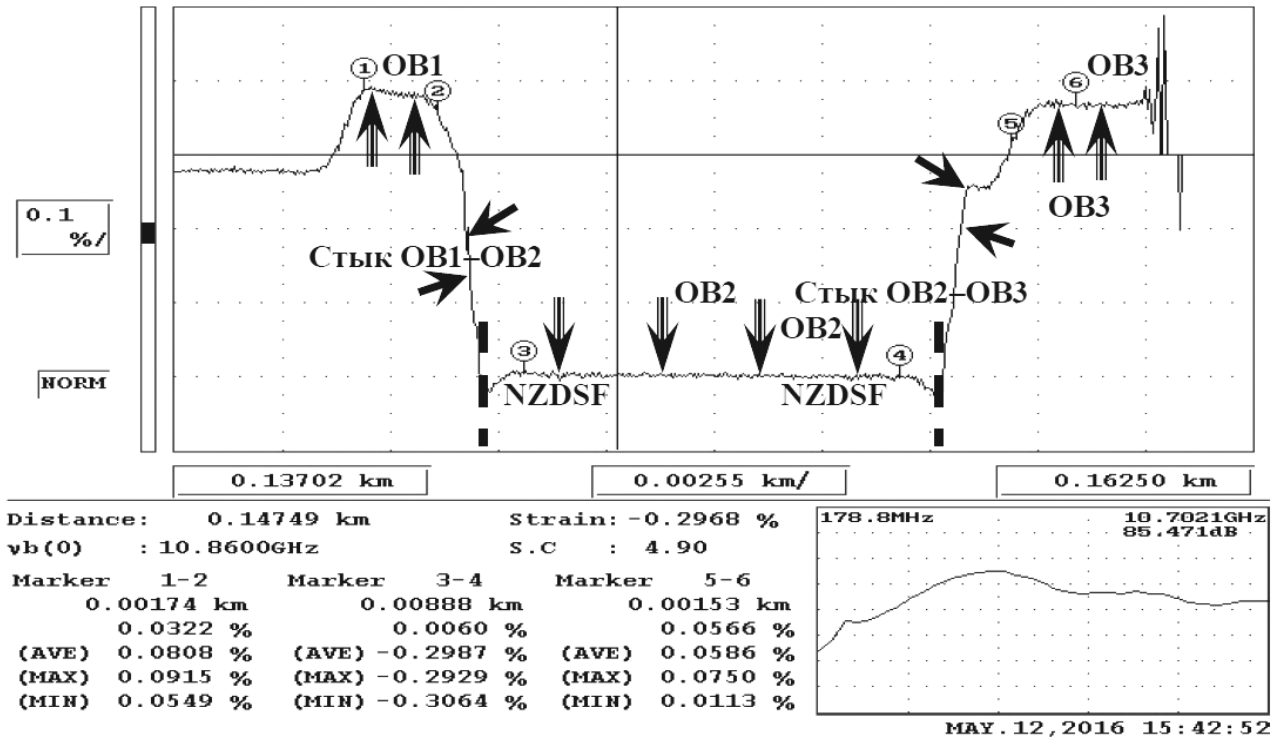


Рис. 8. Зависимость натяжения волокон (G.652–G.655(NZDSF)–G.657) при нагреве участков до +90 °C

Профиль СБР NZDSF, как видно из рис. 7 и рис. 8, имеет 3 максимума, однако, в отличие от профилей ОБ со смещённой дисперсией (DSF – dispersion-shifted single mode fiber), представленных в [5, 8, 10], первый «горб» явно преобладает на фоне второго и третьего.

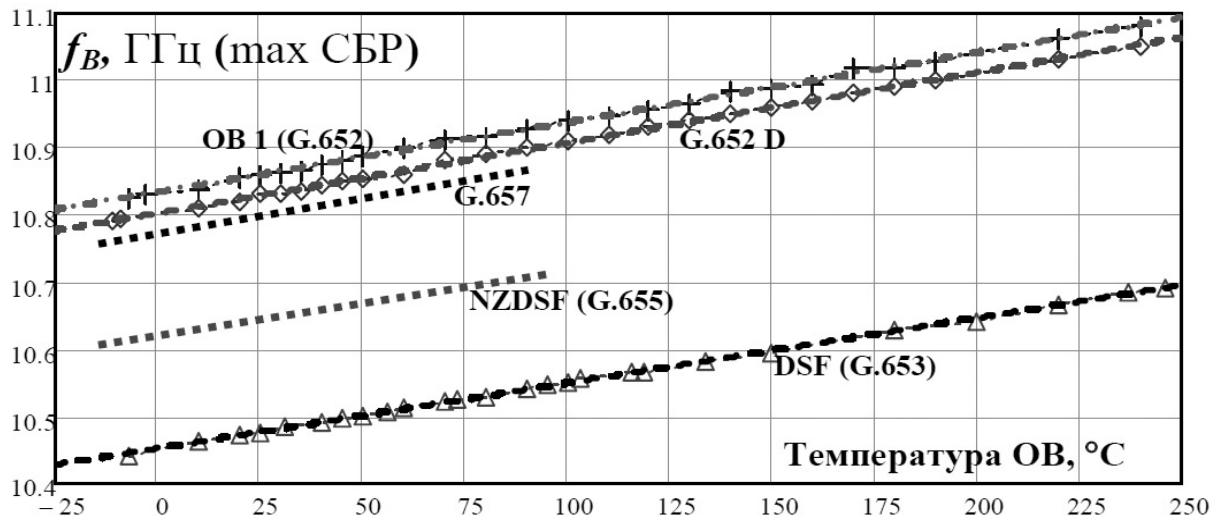
Таким образом, при изменении температуры от –10 °C до +90 °C бриллюэновское смещение частоты (f_B) для ОБ–G.652 изменилось от 10.8 ГГц до 10.9 ГГц, для NZDSF – от 10.6 ГГц до 10.7 ГГц, а для ОБ–G.657 – от 10.75 ГГц до 10.85 ГГц.

Соответствующие изменения натяжения для ОБ–G.652 составили от –0.02% до 0.10%, для NZDSF – от –0.44% до –0.29%, а для ОБ–G.657 – от –0.23% до –0.08%

В результате анализа спектра бриллюэновского рассеяния были построены температурные зависимости для различных видов оптических волокон: G.652, G.653, G.655, G.657.

На рис. 9 приведены температурные зависимости смещения максимума СБР (f_B) для различных видов ОБ.

Рис. 9. Температурные зависимости смещения СБР (f_B) для различных видов ОБ



Кроме зависимостей, полученных в экспериментах, рассмотренных в этой работе, для сравнения приведены также графики для других видов ОБ, полученных в более ранних экспериментах [7 – 10].

Для всех видов волокон, рассмотренных в работе, наблюдалась линейная зависимость бриллюэновского частотного сдвига и соответствующих характеристик натяжения.

На рис. 10 приведены соответствующие температурные зависимости натяжения ОВ.

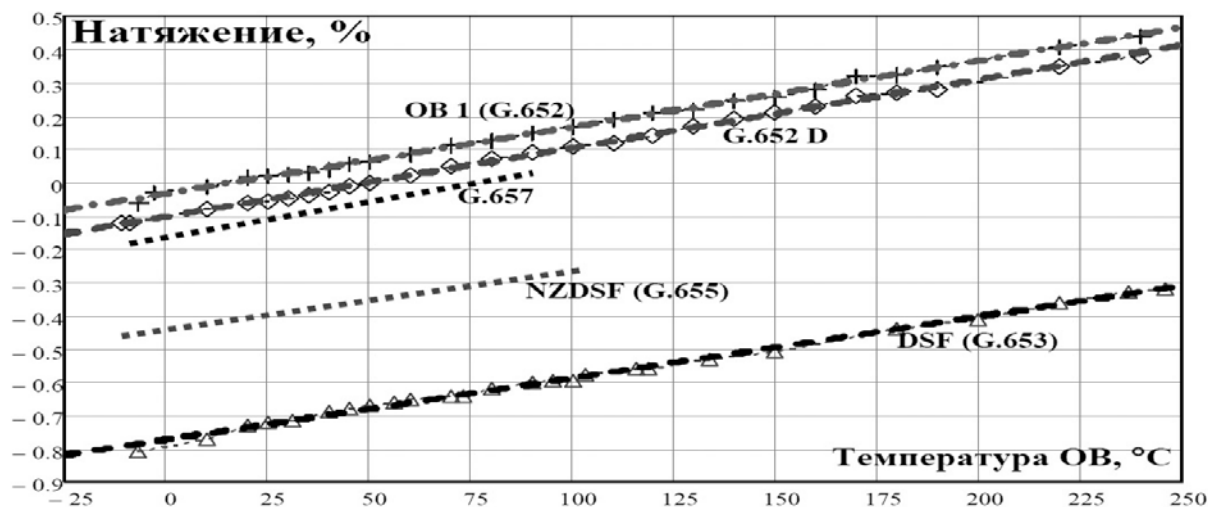


Рис. 10. Температурные зависимости натяжения для различных видов ОВ

Как следует из экспериментов [8, 10], натяжение NZDSF имеет меньшее смещение СБР в сторону меньших частот и меньшее смещение натяжения в отрицательную область, по сравнению с DSF.

Характеристики ОВ-G.657 и ОВ-G.652 отличаются незначительно и проходят выше характеристик NZDSF.

В. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтвердили возможность обнаружения участков с изменённой температурой ОВ на основании анализа СБР в нём.

В результате анализа спектра бриллюэновского рассеяния были построены температурные зависимости для различных видов оптических волокон: G.652, G.653, G.655, G.657.

Для всех видов волокон, рассмотренных в работе, наблюдалась линейная зависимость бриллюэновского частотного сдвига и соответствующих характеристик натяжения.

Оказалось, что NZDSF по характеристикам СБР и натяжения занимает промежуточное положение между обычными ОВ (G.652) и DSF (G.653).

При обычной методике анализа для NZDSF получается отрицательное натяжение, хотя и существенно меньшее, чем для DSF (G.653) (на 0.4%).

Характеристики G.657 отличаются от характеристик G.652 незначительно и проходят выше характеристик NZDSF.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 288 с.
2. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон связи. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
3. Агравал Г. Применение нелинейной оптики. СПб.: Лань, 2011. 592 с.
4. Palchun Y. A., Sitnov N. Y., Gorlov N. I. Monitoring and Methods of Early Diagnostics of Damage to Optical Fibers // Measurement Techniques. 2010. Vol. 53, no. 5. P. 495–501.
5. AQ 8603. Optical fiber strain analyzer. Instruction manual AS-62577. Japan, Ando Electric Co Ltd, 2001. 190 p.
6. Bogachkov I. V. Experimental Researches of the Temperature Influence on Brillouin Backscattering Spectrum and Strain Characteristics of Optical Fibers // IEEE 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. 2014. V. 1. P. 190–194.
7. Bogachkov I. V., Maystrenko V. A. Experimental examinations of changes influence of the Brillouin backscattering spectrum in optical fibers on their characteristics // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014 – Proceedings. 2014. P. 1–10.
8. Bogachkov I. V. Researching of features of the Brillouin Backscattering Spectrum in Dispersion-Shifted Optical Fibers // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2016. М., 2016. P. 1–6.

9. Belal M., Newson T. P. Experimental Examination of the Variation of the Spontaneous Brillouin Power and Frequency Coefficients Under the Combined Influence of Temperature and Strain // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30, no. 8. P. 1250–1255.

10. BOTDR Measurement Techniques and Brillouin Backscatter Characteristics of Corning Single-Mode Optical Fibers. URL: http://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/RC-%20White%20Papers/WP-General/WP4259_01-15.pdf

УДК 621.382.02(075):519.25

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

И. А. Ершов, О. Б. Воскобойникова, О. В. Стукач
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
tomsk@ieee.org

Аннотация – В статье обсуждается проблема моделирования процессов в электронной промышленности как целостной системы. Дается простая методика применения кластерного анализа процессов в полупроводниковом производстве. Приводятся результаты математического моделирования реальных данных с предприятия полупроводниковой индустрии Томска. В качестве независимой переменной выступает процент выхода годных изделий, остальные переменные представляют собой технологические параметры и результаты промежуточного контроля на всем протяжении технологического маршрута. Дается алгоритм выявления групп переменных, значимо влияющих на выход годных изделий, и исключения незначимых переменных для построения прогноза. Результаты имеют практическое значение для решения проблемы анализа больших объемов данных в производстве полупроводниковых приборов.

Ключевые слова : Контроль качества, производство полупроводников, производительность, интегральная микросхема.

I. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Производство полупроводниковых приборов становится одной из крупнейших отраслей в мире. Ключевым аспектом этой отрасли становится производство интегральных микросхем. В полупроводниковом производстве интегральные схемы производятся в одном технологическом цикле на кремниевой подложке. Чтобы уменьшить затраты на производство, совершенствуется как технологический процесс, так и управление производством на основе интегрированных систем управления качеством. Методология управления качеством постепенно выходит на передний план в производстве микросхем, так как она напрямую связана с технологическим маршрутом и способствует повышению выхода годных изделий более чем на треть [1].

Важную роль в производстве полупроводниковой продукции отводится для контроля качества выпускаемой продукции. Эффективное решение задачи непрерывного повышения технологического уровня и экономической эффективности полупроводникового производства требует привлечения адекватных статистических моделей, описывающих распределение дефектов и выхода годных изделий.

II. ДАННЫЕ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

Особенность производства полупроводниковых приборов заключается в том, что процесс производства одной интегральной схемы на полупроводниковых пластинах составляет нескольких сотен шагов, а длительность процесса может составлять несколько недель. Технологические параметры процесса собираются практически на каждом шаге, в результате чего накапливается большой объем информации (рис. 1).

До окончания изготовления продукта проводится скрининг – процесс выполнения испытаний ограниченного объема. Рентабельность скрининга связана с выявлением сложных отношений между характеристиками тестовых изделий и выходными параметрами, которые трудно идентифицировать. Значительный объем данных, получаемый в результате проверок в процессе производства зачастую слишком велик для исследователей, чтобы определить, насколько надежны пластины, или же многие чипы должны быть отброшены или доработаны до готового изделия.

Другая трудность состоит в том, что сами данные измерений могут оказаться неточными или неверными. Если пластина полностью прорабатывается до момента скрининга и допускается до остальных этапов изготов-

ления, все еще есть вероятность, что она может иметь неудовлетворительные характеристики, если во время обработки были допущены ошибки.

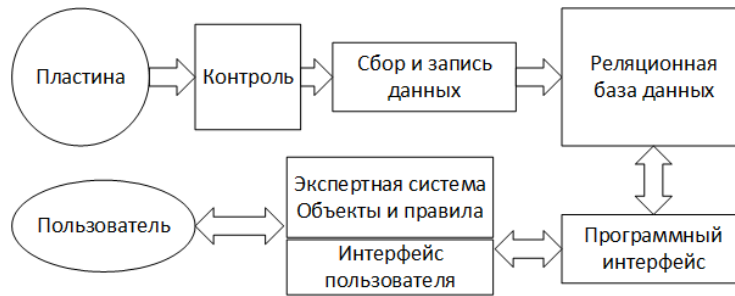


Рис. 1. Общая структура обработки данных в информационной системы полупроводникового производства

III. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Количество операций в технологическом маршруте достигает нескольких сотен. Контроль качества происходит лишь на некоторых этапах обработки пластин. Для оперативного сбора технологических параметров и контроля прохождения каждой пластины по технологическому маршруту имеется информационная система хранения данных. Но система может помочь локализовывать операции, на которых возникает брак и выявлять причины некачественного выполнения операции, только если имеется модель процесса с потенциальными характеристиками качества. Эта модель создаётся не для идеального процесса, который недостижим в реальном производстве, а для достижимого процента выхода годных изделий. Это отличает данную работу от известных, например [2], где модель строится на идее подгонки данных к распределениям Пуассона или Бернулли, что зачастую недостижимо в современных условиях.

Для данных с большим количеством переменных в первую очередь исключаются слабокоррелированные с независимой переменной, то есть процентом выхода годных изделий. Исключаются также переменные, представляющие собой результаты измерений технологических параметров, не несущие информативной значимости для поставленной задачи. Данному шагу требуется уделить особое внимание, поскольку при наличии лишних переменных анализ приведёт к некорректным решениям. В первую очередь это связано с тем, что выводы по полученным результатам невозможно будет интерпретировать. Особенность обрабатываемых данных связана с особенностью полупроводникового производства: каждая последующая переменная представляет собой результат какой-то контрольной операции на предыдущем шаге, поэтому строго говоря, все переменные зависят друг от друга. Обработка данных проводится в программе Statistica [3]. Фрагмент данных приведён на рис. 2.

Рабочий вариант.sta* (12v by 74c)											
1 % выхода годных	2 качество изоляции	3 контроль ёмкости	4 контроль транзистора	5 контроль ёмкости конд-ов	6 контроль ёмкости кон-ов - край	7 Контроль толщины Ац, мкм	8 Контроль толщины пластины - верх	9 Контроль толщины пластины - центр справа	10 Контроль толщины пластины - низ	11 Контроль толщины пластины - слева	
64	0,02	23	34,2	4,03	4,07	3,4	96	96	96	95	
64	0,02	22	33,8	4,03	4,08	3,43	98	105	98	98	
62	0,01	22	34,2	4,03	4,06	3,5	95	100	95	95	
49	0,02	23	34	4,03	4,09	3,2	104	101	102	104	
51	0,02	22	33,7	3,95	4	3,4	97	95	99	97	
62	0,02	22	33,8	4	4,05	3,4	104	103	98	97	
64	0,02	21	33,4	4,01	4,05	3,5	99	105	100	96	
63	0,02	23	33,2	4,15	4,2	3,4	95	96	96	101	
48	0,01	23	33,3	4,12	4,17	3,5	97	98	96	100	
60	0,01	23	33,2	4,05	4,09	3,5	96	99	98	103	
46	0,02	23	33	4,13	4,18	3,3	95	99	97	96	
58	0,02	22	33	4,21	4,25	3,3	105	105	90	97	
64	0,02	23	32,6	4,09	4,14	3,3	97	101	96	96	
52	0,02	23	33,2	4,05	4,1	2,6	97	97	102	95	
37	0,03	23	33,2	4,17	4,2	2,7	105	95	101	95	
50	0,03	22	33,3	3,98	4,07	3,54	98	100	99	100	
64	0,02	22	33,6	4	4,07	3,3	103	102	97	95	
52	0,03	22	33,2	3,9	3,9	3,88	98	93	99	98	
53	0,02	22	34,2	3,9	3,97	3	103	105	98	104	
48	0,02	24	39,5	3,93	3,98	4,55	95	102	97	99	
28	0,06	24	39,6	3,91	3,96	5,36	96	100	100	102	
40	0,02	23	39,9	3,88	3,94	5,36	96	97	95	95	
49	0	21	39,9	3,86	3,9	31,3	101	95	104	100	
45	0	23	41,6	3,94	4	3,4	100	99	103	105	
42	0	22	41,8	3,91	3,97	3,41	96	98	99	97	
65	0	27	44,5	4,03	4,14	2,88	102	99	95	94	
63	0	27	44,7	4,04	4,17	3,16	97	100	95	95	
38	0,03	24	41	3,98	4,03	2,5	100	105	104	98	
56	0,02	22	40,8	3,94	3,99	2,6	100	96	97	102	

Рис. 2. Фрагмент данных

Взаимная зависимость переменных и их большое количество делает невозможной регрессионный или факторный анализ. В данной работе модель строится с помощью методов кластерного анализа, что дополнительно позволяет визуализировать данные для оператора и помогает принятию решения. Для метода кластеризации был выбран метод k-средних, поскольку данный метод обеспечивает допустимую точность, имеет понятный алгоритм и информативные результаты. Из [3] следует, что метод k-средних не допускает пустых ячеек в данных. Большинство измерений делается автоматически, поэтому проблем с пропусками не возникает.

Измерения на контрольных точках технологических операций имеют разный масштаб, разные единицы измерения и разный смысл. Поэтому для проведения кластерного анализа данные необходимо нормировать [4]. Нормирование также делается в программе Statistica путём вычитания из каждого наблюдения среднего значения соответствующей переменной и деления на стандартное отклонение.

Для получения обоснованного количества кластеров и уменьшения погрешности результата, связанной с субъективной оценкой количества кластеров, был использован метод построения дендрограммы. Для удобства все переменные были пронумерованы, а зависимая переменная – процент годных изделий был обозначен знаком %. Полученная дендрограмма показана на рис. 3.

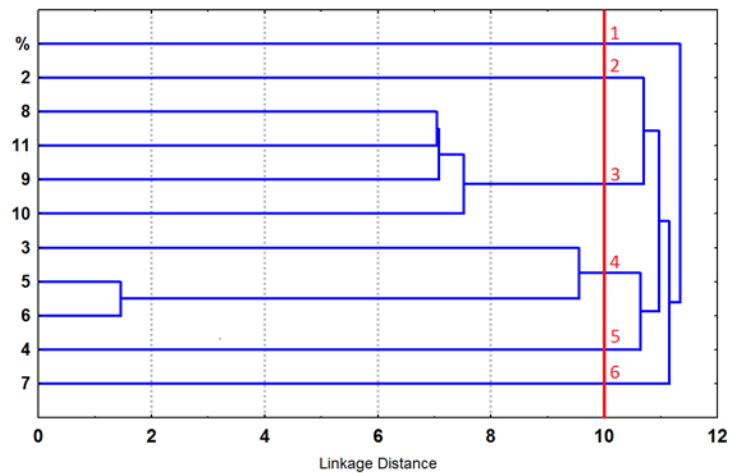


Рис. 3. Дендрограмма

Чтобы определить количество кластеров по дендрограмме, требуется выбрать пороговое расстояние. Зачастую это расстояние неизвестно, поэтому для решения задачи можно использовать резкое уменьшение расстояния между переменными. Малое количество кластеров неминуемо приведёт к сильным искажениям результата, а большое количество кластеров сделает анализ трудно интерпретируемым. Предложенное пороговое расстояние и разделение на кластеры показано на рис. 3 в виде вертикальной линии. В данном примере количество кластеров было выбрано равным 6.

После применения метода k-средних для переменных требуется проверить каждый кластер на соответствие модели, полученной из дендрограммы. При сильном отличии элементов кластеров, полученных методом k-средних, от кластеров, полученных методом построения дендрограмм, требуется найти причину несоответствия. Без устранения причины несоответствия дальнейший анализ может привести к неверным решениям. В данном примере отличие от модели заключается в объединении в один кластер 3 и 4 множеств. Данное несоответствие незначительно, поскольку эти показатели относятся к одной и той же ветви дендрограммы и являются не критично отличающимися от других переменных.

Для интерпретации результатов применения метода k-средних требуется использовать расстояние между центрами масс кластеров, то есть расстояние между кластером, состоящей, в идеальном случае, из одной интересующей нас переменной и центрами масс других кластеров. В данном примере важен процент выхода годных изделий. Поэтому чем ближе центр масс другого кластера к этой переменной, тем теснее связь и влияние. Расстояния между переменной и другими кластерами вычисляются в программе Statistica и даются в результирующей табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КЛАСТЕРАМИ

Cluster Number	Squared distances above diagonal					
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
No. 2	1,33	0,00	1,96	1,98	2,43	2,38

Из данной таблицы можно сделать вывод о том, что наиболее близкий к данной переменной является кластер под номером 1. Соответственно переменные, входящие в данный кластер, оказывают наибольшее влияние на процент выхода годных изделий. Переменные, входящие в первый кластер и их расстояния от центра кластера обозначены в табл. 2. Это все промеры толщины пластины.

ТАБЛИЦА 2
ЭЛЕМЕНТЫ, ВХОДЯЩИЕ В КЛАСТЕР 1

Variable	Distance
8	0,49
9	0,60
10	0,59
11	0,55

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современном мире каждое предприятие стремится к большей производительности, обеспечению конкурентоспособности как на внутреннем, так и на внешнем рынке, к востребованности выпускаемой продукции и, впоследствии, получения наибольшей прибыли. Этого невозможно достигнуть без управления качеством на всех стадиях жизненного цикла продукции. На предприятии существует множество причин, влияющих на качество продукции и выход годных изделий, но обнаружить их удается не всегда. В данном исследовании построена модель полупроводникового производства и разработаны рекомендации по применению кластерного анализа для управления производством на основе статистической информации о процессах и их визуализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аймагамбетова Р.Ж., Стукач О.В. Оценка качества процессов напыления слоев полупроводниковых материалов в производстве электронных изделий с помощью кластеризации методом k-средних // Современные методы оценки и оборудование в металловедении: труды международной научно-практической конференции, 30 октября 2015 г. Карагандинский государственный технический университет. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2015. С. 50–51.
2. Koren I., Koren Z. Defect Tolerance in VLSI Circuits: Techniques and Yield Analysis // Proceedings of the IEEE. Sept 1998. Vol. 86. P. 1817–1836.
3. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL: учеб. пособие. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004. 464 с.
4. Ершов И.А., Стукач О.В. Использование корректного нормирования статистических данных в кластерном анализе // Современные технологии поддержки принятия решений в экономике: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Юрга, 19-20 ноября 2015 г. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2015. С. 32–34.

УДК 621.396

ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДОВ СЛЕДОВАНИЯ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ НА СКОРОСТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ РЛС

С. Н. Жиганов

*Муромский институт, филиал Владимирского государственного университета,
г. Муром, Россия*

Аннотация – Рассчитаны скоростные характеристики системы селекции движущихся целей импульсно-доплеровской РЛС, построенной на однократном устройстве ЧПК при различных законах изменения периодов следования зондирующих сигналов. При этом рассмотрены законы изменения периодов следования зондирующих сигналов из девяти и шестнадцати импульсов, полученные на основе кодовых последовательностей Френка и Рх.

Ключевые слова: неэквилибриальные последовательности, вобуляция периодов следования импульсов, скоростная характеристика.

I. ВВЕДЕНИЕ

Системы селекции движущихся целей (СДЦ) являются необходимым составным элементов, современной радиолокационной станции (РЛС) [1, 2]. Качество подавления мешающих отражений от пассивных помех зависит от эффективности работы этой системы. Наиболее часто система СДЦ реализуется в виде однократного или многократного устройства черезпериодной компенсации (ЧПК), либо в виде рекурсивных фильтров различных порядков [1, 2]. Эти устройства имеют достаточно простую структуру обработки поступающих сигналов, но при этом обладают высоким качеством подавления пассивных помех. Однако существенным недостатком таких устройств, при использовании в качестве зондирующего сигнала регулярной последовательности импульсов (период следования импульсов $T = \text{const}$), является периодичность скоростной характеристики с интервалом $1/T$. В результате этого появляется неоднозначность в оценке значения частоты Допплера отраженного сигнала и «слепые» скорости, когда частотная характеристика проваливается до нуля, поэтому диапазон работы таких устройств ограничен частотой $1/(2T)$.

Возможным выходом из этой ситуации является использование в качестве зондирующих сигналов неэквидистантные последовательности импульсов, периоды следования которых изменяются по определенному закону. При этом диапазон работы устройства ЧПК по частоте расширяется, провалы частотной характеристики уменьшаются.

До настоящего времени предложено несколько законов изменения периодов следования импульсов. В работе [3] упоминаются линейные законы изменения периодов следования, рассмотренные в книгах [1, 2] эмпирические законы позволяют улучшить скоростную характеристику устройства СДЦ по сравнению с регулярной последовательностью импульсов. Выбор наилучшей последовательности, применяемой в устройстве СДЦ, остается до сих пор открытым.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется определить скоростные характеристики системы СДЦ, реализованной в виде однократного устройства ЧПК, при использовании в качестве зондирующих сигналов неэквидистантные последовательности импульсов различной длины, полученные при помощи кодовых последовательностей Френка и R_x [4]. Работа основана на предыдущих работах автора [5, 6] и его коллег [7–9].

III. СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА ЧПК ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕЭКВИДИСТАНТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ИМПУЛЬСОВ

Самым простым, но в то же время достаточно эффективным является однократное устройство ЧПК, структурная схема которого приведена на рис. 1.

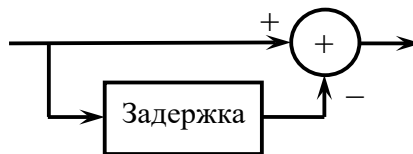


Рис. 1. Структурная схема однократной системы ЧПК

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) устройства ЧПК является периодической функцией, изменяющейся от нуля до 2. Нули частотной характеристики приходятся на точки $1/T, 2/T, \dots, k/T, \dots$ [1, 2].

АЧХ однократной системы ЧПК является существенно неравномерной в полосе прозрачности, поэтому для улучшения равномерности применяются многократные последовательные и параллельные системы ЧПК и рекурсивные фильтры [1]. Однако в работе [3] показано на примере последовательности с линейным законом изменения периодов следования, что частотные характеристики многократных устройств ЧПК и рекурсивных фильтров хуже, чем у однократного устройства ЧПК, поэтому здесь будем рассматривать частотные характеристики однократной системы ЧПК. Закон изменения периодов следования импульсов в последовательности можно задать в соответствии с известными кодовыми последовательностями, в частности, Френка и R_x . В работе [5] рассмотрены корреляционные свойства последовательностей импульсов, периоды следования которых определялись в соответствии с кодами Френка.

Построение закона изменения периодов следования четырех импульсов неэквидистантной последовательности на основе кода Френка основано на матрице [6]

Матрице Френка размером 3×3

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 4 \end{pmatrix}$$

соответствует закон изменения периодов следования импульсов

$$(TTTTT + \Delta TT + 2\Delta TT + 2\Delta TT + 4\Delta T), \quad (1)$$

где ΔT – интервал изменения периода следования.

Матрице Френка размером 4×4

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 2 & 4 & 6 \\ 0 & 3 & 6 & 9 \end{pmatrix}$$

соответствует закон изменения периодов следования импульсов

$$(TTTTTT + \Delta TT + 2\Delta TT + 3\Delta TT + 2\Delta TT + 4\Delta T + 6\Delta TT + 3\Delta TT + 6\Delta TT + 9\Delta T). \quad (2)$$

Периоды следования зондирующих импульсов в соответствии с кодами Rx имеют вид

$$(T + \Delta TT - \Delta TT - \Delta TT + \Delta TT - 3\Delta TT + 3\Delta T). \quad (3)$$

$$(T + 9\Delta TT + 3\Delta TT - 3\Delta TT - 9\Delta TT + 3\Delta TT + 1\Delta TT - \Delta TT - 3\Delta TT - 3\Delta T - \Delta TT + \Delta TT + 3\Delta TT - 9\Delta TT - 3\Delta TT + 3\Delta TT + 9\Delta T). \quad (4)$$

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

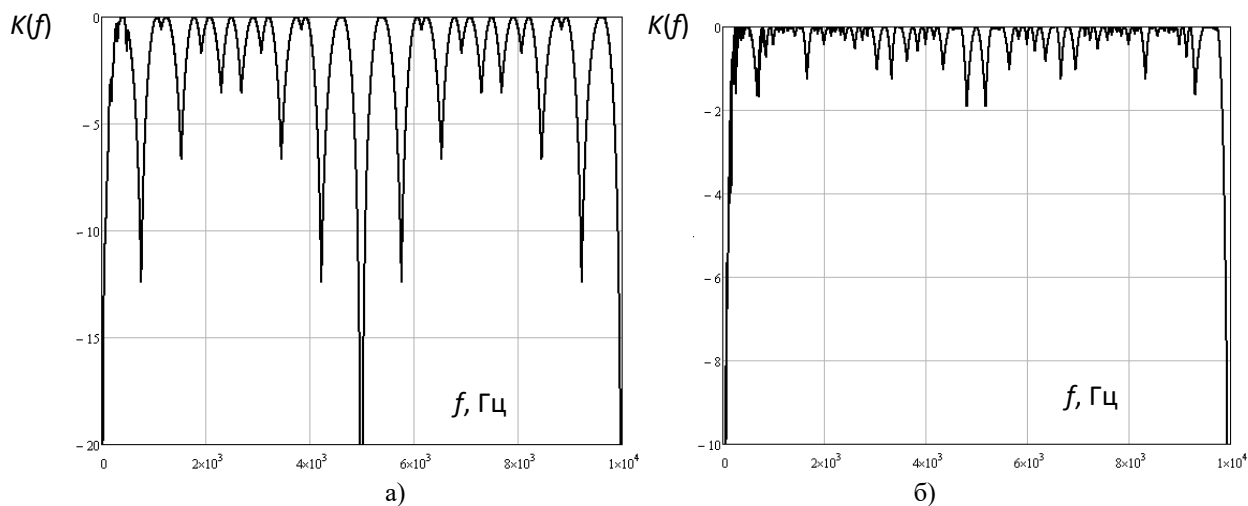


Рис. 2. Скоростные характеристики устройства ЧПК при изменении периодов следования импульсов на основе кодов Френка

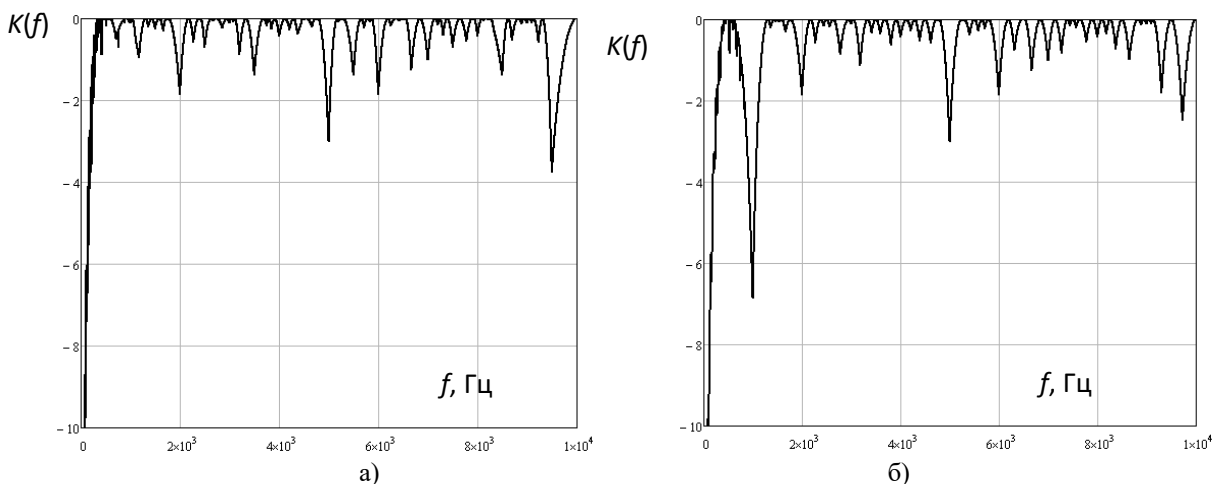


Рис. 3. Скоростные характеристики устройства ЧПК при изменении периодов следования импульсов на основе кодов Rx

На рис. 2 а, б) приведены скоростные характеристики устройства ЧПК рис. 1 при подаче на его вход последовательностей (1) и (2) при $T = 1$ мс и $\Delta T = 50$ мкс соответственно, полученных на основе кода Френка. Из рис. 2 видно, что при применении неэквилидистантной последовательности (1) в диапазоне изменения скоростей остается только один провал, при использовании последовательности (2) скоростная характеристика является достаточно равномерной с максимальными провалами не более 2 дБ. На рис. 3 а, б) приведены скоростные характеристики устройства ЧПК при подаче на его вход последовательностей (3) и (4), полученных на основе кодов Rx при 9 и 16 зондирующих импульсах. Из сравнения рис. 2 и 3 видно, что при 9 импульсах скоростная характеристика устройства ЧПК лучше, если использовать коды Rx, а при 16 импульсах наоборот.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что использование неэквилидистантных последовательностей в устройстве ЧПК вместо регулярных позволяет улучшить скоростную характеристику этого устройства. Увеличение количества импульсов в последовательности вызывает улучшение частотных свойств устройства ЧПК. Применение последовательностей, полученных на основе кода Френка более эффективно, по сравнению с последовательностями, построенными на основе кодов Rx.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-02-97510 p_центр_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулев П.А., Степин В.М. Методы и устройства селекции движущихся целей. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
2. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника. Нью-Йорк, 1970: Пер. с англ. (в четырех томах) / Под общей ред. К.Н. Трофимова; Том 3. Радиолокационные устройства и системы/ Под ред. А.С. Виницкого.- М.: Сов. Радио, 1978. – 528 с.
3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию.- Киев: Издательство КВіЦ, 2000. – 428 с.
4. Nadav Levanon, Eli Mozeson. Radar signals. John Wiley & Sons Inc. (2004).
5. Zhiganov S.N. Correlation and frequency properties of nonequidistant pulse sequence obtained by means of Frank codes Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”. 2014. pp. 334-335. IEEE 318 Catalog Number: CFP14788 -CDR; Code 109221. (DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959419)/
6. Zhiganov S.N., Smirnov M.S. An automated control system by probe signal generator in radar Procedia Engineering, 129 (2015), 178-183.
7. Chekushkin V.V., Panteleev I.V., Mikheev K.V. Improving Polynomial Methods of Reconstruction of Functional Dependences in Information-Measuring Systems. Measurement Techniques July 2015, Volume 58, Issue 4, PP 385-392. ISSN 0543-1972. DOI 10.1007/s11018-012-0051-7.
8. Danilin S.N., Makarov M.V., Shchanikov S.A. The method of tolerance increasing to internal and external noises for neural network devices - Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”. 2014. pp. 320-321. IEEE 318 Catalog Number: CFP14788. (DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959412).
9. S.N. Danilin, M.V. Makarov and S.A. Shchanikov, Numerical Simulation of Neural Network Components of Controlling and Measuring Systems - Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 756. PP. 507-512.

УДК 621.371.362

КОРОТКОВОЛНОВЫЙ РЕТРАНСЛЯТОР КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

З. А. Захарьян¹, С. Д. Сорокин², В. Л. Хазан³

¹ООО «ОМЕГА», г. Омск, Россия

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия

³Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Статья посвящена актуальной задаче - дифференциальным глобальным системам позиционирования (ДГСП), используемым в геодезии, в прецизионном сельском хозяйстве, в системах транспортного мониторинга и в другого рода системах, связанных с определением географических координат. Поставленной целью является расширение зоны действия этих систем за счет удаленных от об-

служиваемых зон на оптимальные для распространения декаметровых радиоволн расстояния, коротковолновых (КВ) ретрансляторов, которые передают корректирующую информацию.

Ключевые слова: обслуживаемая зона, база ДГСП, управляемый объект, корректирующий сигнал, КВ ретранслятор.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире уже функционирует пять спутниковых навигационных системы, которые принадлежат разным странам: GPS принадлежит США, ГЛОНАС принадлежит России, а GALILEO, Beidou и IRNSS принадлежат соответственно ЕС, Китаю и Индии. Создает свою собственную навигационную спутниковую систему QZSS и Япония. С помощью этих навигационных систем возможно определять координаты точек на поверхности Земли. Точность определения координат зависит от многих причин. Например, если имеется возможность достаточно долго производить усреднение полученных оценок значений координат в одной и той же точке, то возможно получить максимально достижимую точность без каких-либо дополнительных мер. Если же нет возможности усреднения полученных оценок координат по времени, например, в случае движения объекта, то точность определения координат будет снижена по причине влияния на радиосигнал, излучаемый спутником, ионосферы и тропосферы, а также влияния на точность расчетов формы Земли, которая отличается от строго шарообразной и по некоторым другим причинам. В итоге ошибка при определении координат без принятия дополнительных мер в лучшем случае может составить порядка 10 метров, что недопустимо во многих случаях. Для повышения точности необходимо обеспечить оперативную передачу конечному потребителю корректирующей информации.

II. ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Метод повышения точности определения координат с помощью навигационных спутниковых систем даже для относительно быстро перемещающихся объектов осуществляется с помощью дифференциальных глобальных систем позиционирования.

Принцип действия этих систем заключается в следующем.

Посредством долговременного усреднения оценок координат определенных точек на земной поверхности получают достаточно точные значения с ошибкой менее одного сантиметра, т. е. значения фактически истинных, абсолютно точных координат этих точек. В этих точках размещают приемную антенну навигационной системы, имеющейся на базах ДГСП, которые, как и обычные навигационные системы, все время определяют текущие оценки координат собственного местоположения. Эти оценки постоянно сравниваются с известными точными значениями координат расположения самих баз и таким образом в текущем времени определяются ошибки, которые обусловлены всеми возможными причинами. Эти ошибки будут такими же, как и на объектах, находящихся в достаточно большой зоне, окружающей базу ДГСП. Следовательно, если сообщать объекту, находящемуся в зоне, которую обслуживает база ДГСП, значения ошибок, существующих в данный момент времени в данном месте, то эти ошибки навигационными приборами данного объекта могут быть компенсированы и объект сможет таким образом определить свои истинные координаты в текущий момент времени с минимальной ошибкой. Одна базовая ДГСП станция способна обслуживать сколько угодно много окружающих ее объектов, которым требуется производить коррекцию координат их местоположения.

Каналы связи для передачи сигналов коррекции ошибок могут быть различными. Особенностью всех каналов коррекции ошибок является то, что передаваемый сигнал должен быть доставлен на объект с минимальной задержкой, исчисляемой секундами, пока коэффициент корреляции между оценками координат на базе ДГСП и на объекте имеет значения, близкие к единице. В противном случае точность оценки координат будет падать.

Каналами связи между базой ДГСП и объектом могут служить УКВ радиоканалы, для которых на базе устанавливается достаточно высокая антенна для покрытия как можно большей площади. Однако возможности такого варианта ДГСП ограничиваются радиусом зоны, которую обслуживает УКВ радиопередатчик сигналов коррекции ошибок. Дело в том, что радиоволны УКВ диапазона частот способны распространяться только в пределах прямой видимости между антеннами передатчика и приемника. Расстояние прямой видимости L (в километрах) можно оценить по относительно простой общеизвестной формуле:

$$L = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),$$

где h_1 и h_2 высоты подъема взаимодействующих УКВ радиостанций (в метрах).

Если считать, что объект имеет антенну, поднятую на высоту $h_2=2$ м, то можно рассчитать дальность УКВ канала связи в зависимости от высоты h_1 подъема антенны базы ДГСП. Результаты расчета приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

ЗАВИСИМОСТЬ ДАЛЬНОСТИ СВЯЗИ ОТ ВЫСОТЫ ПОДЪЕМА БАЗОВОЙ УКВ АНТЕННЫ

h_1 [м]	10	20	50	100
L[км]	12.4	16.7	25.7	36

Из табл. 1 следует, что для охвата достаточно большой обслуживаемой зоны необходимо антенну базы ДГСП поднимать очень высоко и нереально обеспечить связь в обычных условиях в зоне с радиусом более чем 25 км. Увеличить дальность действия базы ДГСП возможно за счет УКВ ретрансляторов, устанавливаемых между базой и объектами.

Сколько угодно большой радиус обслуживания базой ДГСП можно получить, если воспользоваться спутниковыми каналами связи. Однако на территории России этот метод доступен на очень ограниченных территориях.

Американцы имеют морские радио-буи, передающие сигналы коррекции в длинноволновом и средневолновом диапазонах радиоволн кораблям, находящимся в обслуживаемой ими зоне. Километровые (длинные) и гектометровые (средние) радиоволны имеют достаточно большую длину (тысячи и сотни метров, соответственно) и распространяются далеко за пределы горизонта за счет явления дифракции, огибая Землю и встречающиеся на их пути препятствия. Если их использовать для передачи сигналов коррекции ошибок при оценке координат, то можно обслуживать неограниченное число объектов, находящихся в зоне, которую покрывает средневолновый передатчик базы ДГСП. При этом радиус зоны обслуживания может быть увеличен до 1000 км и без высоко поднятых антенн.

В России уже много лет также ведутся разработки в области наземной инфраструктуры высокоточного спутникового позиционирования. В частности, при участии НПК «Индустриальные геодезические системы» (г. Омск) разработана и эксплуатируется наземная инфраструктура, в составе которой более 200 станций в 60 регионах России. Корректирующая информация в данный момент передается по каналам интернет. В условиях нашей страны необходим канал передачи информации с использованием беспроводных технологий, это особенно востребовано в бурно развивающемся сегменте высокоточного управления машинами и механизмами (например, высокоточное земледелие). Для решения проблемы «последней мили» НПК «ИГС», разработан и проверен алгоритм передачи данных по беспроводным каналам связи на базе которого возможно создание системы трансляции, охватывающей всю территорию России.

III. ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК ДГСП ЧЕРЕЗ УДАЛЕННЫЙ КОРОТКОВОЛНОВЫЙ РЕТРАНСЛЯТОР

Зоны, обслуживаемые базовыми ДГСП, могут быть значительно расширены, если для передачи на объект сигналов коррекции ошибок использовать удаленные на оптимальное для распространения радиоволн расстояние коротковолновые ретрансляторы.

Известно [1], что наиболее благоприятные условия распространения коротких радиоволн наблюдаются на расстоянии 2000–3000 км, которое соответствует односкачковым радиотрассам. Один коротковолновый ретранслятор способен покрыть, как показано на рис. 1, кольцо с внутренним диаметром порядка 2000 км и внешним диаметром порядка 3000 км [2]. Таким образом, все зоны ДГСП, которые находятся в этом кольце, могут пользоваться услугами такого рода ретранслятора.

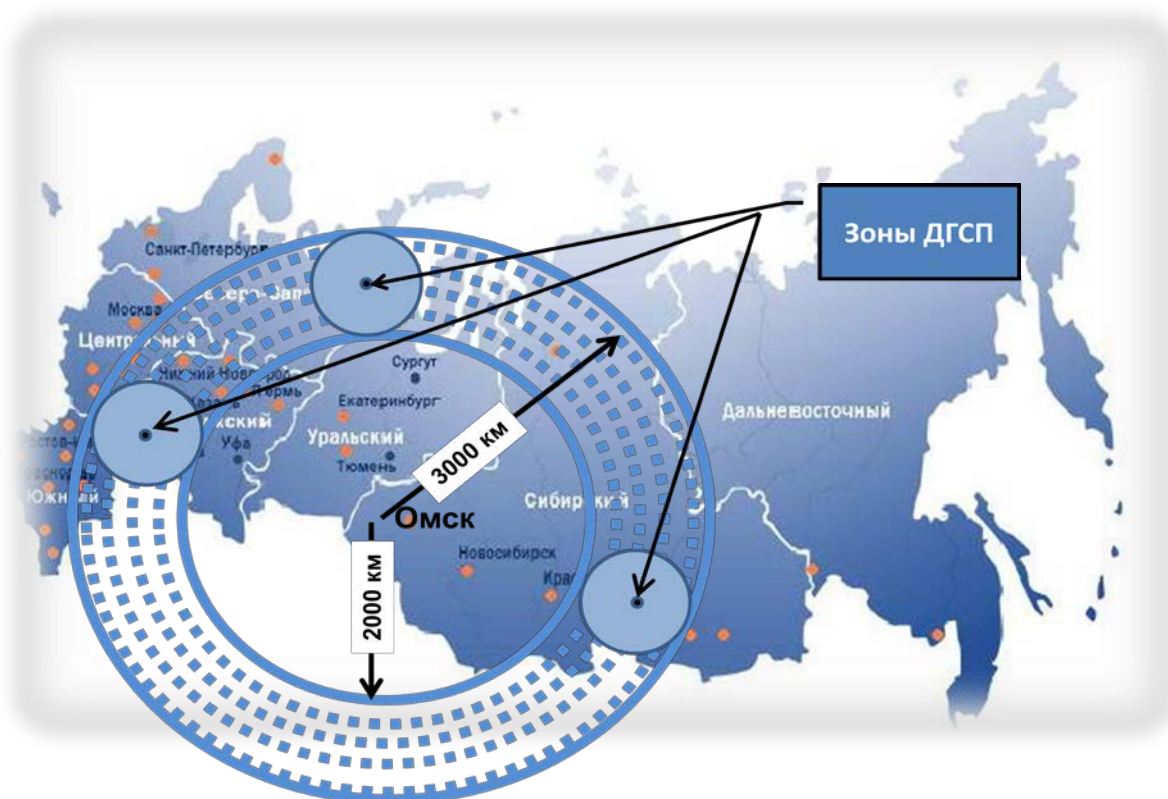


Рис. 1. Зона покрытия коротковолнового ретранслятора, расположенного в г. Омске

Важно отметить, что если число обслуживаемых ретранслятором ДГСП более одного, то ретранслятор берет на себя функции диспетчера и поочередно опрашивает базы всех ДГСП, т. е. работает в режиме уплотнения во времени.

Однако имеются некоторые проблемы при использовании коротковолнового диапазона радиоволн, которые заключаются в том, что передача сообщений с высокой скоростью по декаметровому каналу связи является достаточно сложной проблемой. Для удовлетворения задач, стоящих перед ДГСП, информационная скорость передачи данных по каналу связи должна быть порядка 4800–9600 бит/с. Обеспечить это возможно, воспользовавшись современными методами передачи сообщений, использующими технологию OFDM, заключающуюся в передаче информации по очень большому числу параллельных взаимно ортогональных каналов [3].

IV. ВЫВОДЫ

Использование удаленных от ДГСП коротковолновых ретрансляторов для передачи сигналов коррекции ошибок при оценке координат объекта позволяет обслуживать сколь угодно большое количество зон и все объекты в этих зонах, находящиеся в радиусе от 0 до 1000 км от баз ДГСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коноплева Е. Н. О расчете надежности радиосвязи на коротких волнах // Электросвязь. 1967. № 11. С. 36–38.
2. Хазан В. Л. Система декаметровой мобильной автоматической радиосвязи «МАРС» // Техника радиосвязи. Омск. 1998. Вып. 4. С. 59–66.
3. Hazan V. L., Dulkey I. V., Zemlyanov I. S., Chaschin E. A. Methods to improve the speed of data transmission in HF communication system // IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2014. URL: <http://explore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=7005660&queryText%3DMethods+to+improve+the+speed+of+data+transmission+in+HF+communication+system> (дата обращения: 18.10.2015).

УДК 621.396.674.1

О СПОСОБЕ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ОБРАТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

В. П. Кисмерешкин, Н. А. Косточкина

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В работе приведены результаты компьютерного моделирования направленных свойств систем «линейный вибратор – линейный вибратор», «линейный вибратор – петлевая рамка». Показаны преимущества системы, состоящей из вибратора и петлевого излучателя, выразившиеся в расширении частотного диапазона в части коэффициента защитного действия. Результаты моделирования сопоставлены экспериментальными данными. Расхождение имеет место в части большей диапазонности, достигаемой экспериментально по сравнению с моделью. Анализ полученных результатов показывает, что физика процесса получения однонаправленного излучения по существу верна, однако модель требует уточнения.

Ключевые слова: однонаправленное излучение, петлевой излучатель, линейный вибратор, диаграмма направленности.

I. ВВЕДЕНИЕ

Известные способы снижения обратного излучения основываются либо на взаимодействии резонансных излучателей [1], либо на системах «вибратор – отражатель» [2, 3]. Первая система узкополосна, а вторая обладает, кроме того, значительной парусностью.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является исследование варианта однонаправленной системы на основе взаимодействия линейного вибратора с петлевой рамкой.

III. ТЕОРИЯ

Итак, формирование однонаправленного излучения представляет собой систему из двух линейных электрических вибраторов, согласованных по поляризации и находящихся на расстоянии друг от друга в пределах $(0,2-0,3)\lambda$, где λ – длина волны. При этом индуктивный характер одного из них по отношению к другому приводит к снижению уровня излучения в сторону индуктивного (более длинного), а емкостной характер, в сторону последнего. Таким образом, проектируют эффективные однонаправленные антенные системы продольного излучения. Важным обстоятельством в данном случае является достаточно сильная зависимость эффекта подавления уровня обратного излучения от частоты. Данное утверждение хорошо иллюстрируется на модели и экспериментально. Факт взаимодействия электромагнитного поля вибраторов через напряженности электрических полей очевиден: электрическое поле основного (активного) вибратора и наведенное поле пассивного вычитаются в сторону последнего, если характер его сопротивления индуктивный и складываются в сторону активного.

Представим себе систему, состоящую из линейного вибратора и конструкции в виде вытянутой вдоль линий электрического поля рамки (петли), которые параллельны друг другу. При взаимодействии друг с другом в петлевом излучателе наводятся токи, обусловленные как напряженностью электрического поля, так и напряженностью магнитного поля. В результате в петлевом излучателе наводится пара токов, как это показано на рис. 1

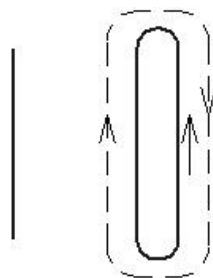


Рис. 1. Токи, наводимые вибратором в петлевом рефлекторе

На частотах, соответствующих длине петли, близкой к резонансной, имеет место описанный выше режим взаимодействия. При отстройке от этой частоты превалируют поля, обусловленные рамкой (петлей). В этом случае в диаграмме направленности появляется множитель $(1+\sin\alpha)$, который вносит уже существенный вклад в формирование направленных свойств системы. На рис. 2 схематично представлен этот процесс.

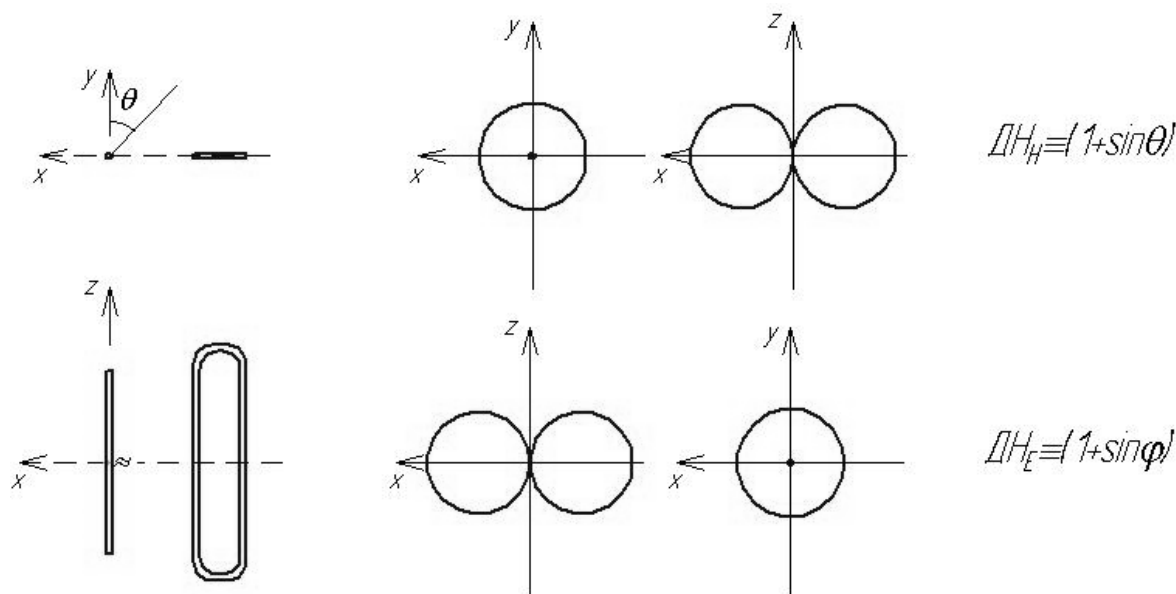


Рис. 2. Формирование диаграмм направленности в «Е» и «Н» плоскостях в системе «линейный вибратор – петлевая рамка»

Как видно из рис. 2, диаграммы направленности системы как в «Е», так и в «Н» плоскостях содержат множитель $(1+\sin\alpha)$, где α – угол обзора.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В данной работе представлены результаты электродинамического моделирования с помощью программного продукта MMANA-GAL. Данная программа для расчета и анализа антенн использует метод моментов, который позволяет свести операторную задачу к системе линейных алгебраических уравнений. Так, были промоделированы две системы: система, состоящая из двух вибраторов, и «линейный вибратор – петлевая рамка». В обоих случаях вибратор и петлевая рамка находятся на расстоянии $0.15\lambda_{\max}$ от активного вибратора. Длина рамки и пассивного вибратора составляет $0.52\lambda_{\max}$. Ключевыми параметрами моделирования являются коэффициент усиления в главном направлении и уровень обратного излучения. В результате получена зависимость этих параметров от частоты.

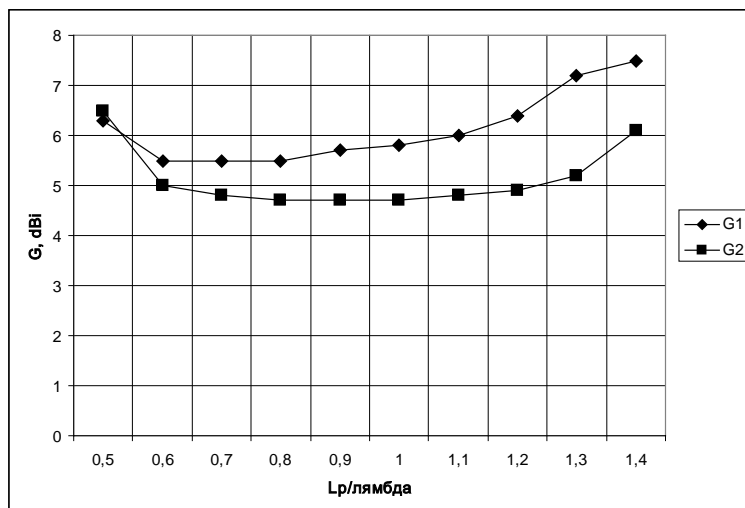


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента усиления систем от соотношения L_p/λ

Ниже приведены результаты моделирования, из которых следует, что налицо существенное расширение частотного диапазона в системе «линейный вибратор – петлевая рамка». На рис. 3. G_1 – коэффициент усиления системы «линейный вибратор – петлевая рамка», G_2 – системы «линейный вибратор – линейный вибратор»; U_1 – уровень обратного излучения системы «линейный вибратор – петлевая рамка», U_2 – уровень обратного излучения системы «линейный вибратор – линейный вибратор».

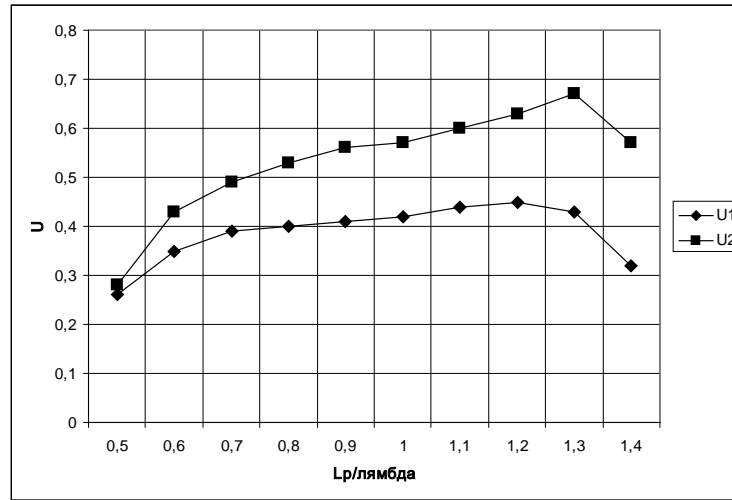


Рис. 4. Графики зависимости уровня обратного излучения систем от соотношения L_p/λ

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты подтверждены экспериментально, достигнуто расширение до 260%. Данное положение внедрено в целый ряд разработок, некоторые решения признаны изобретениями [4, 5, 6].

Так, система, состоящая из пассивного элемента, диапазонного излучателя и директорной структуры [6] в диапазоне (470 – 790)МГц (рис. 5), позволила получить уровень обратного излучения ниже основного более чем на 20 dB. Аналогично обстоит дело и в метровом диапазоне (174 – 230)МГц. Здесь уровень обратного излучения составил около 15 dB.

На частоте 470 МГц: $\frac{U_{обр}}{U_{мвх}} = 0,05$, $\varphi_{0,7L} = 80^\circ$, $\varphi_{0,7H} = 80^\circ$, $G = 8$ dB

На частоте 790 МГц: $\frac{U_{обр}}{U_{мвх}} = 0,08$, $\varphi_{0,7L} = 52^\circ$, $\varphi_{0,7H} = 56^\circ$, $G = 11,4$ dB

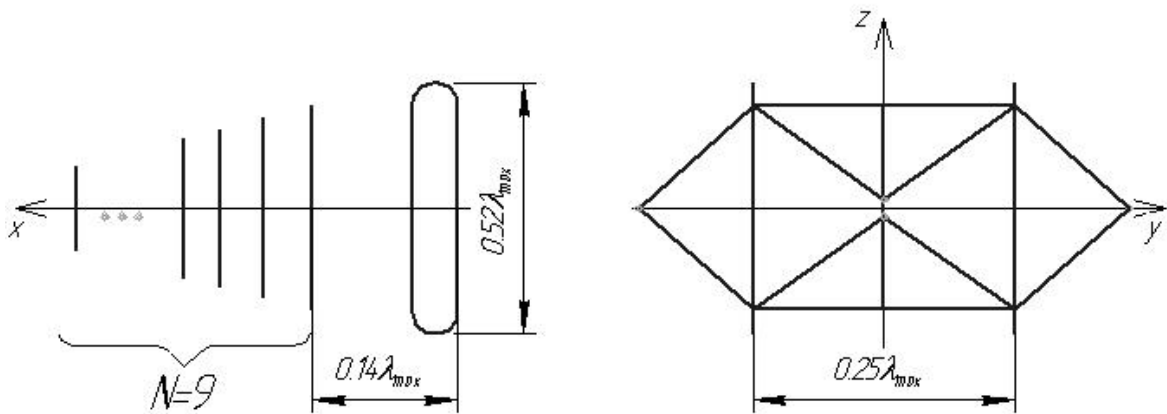


Рис. 5. Система «диапазонный излучатель – петлевой рефлектор – директорная структура»

При установке петлевых рефлекторов около диапазонных излучателей [6] эффективность подавления обратного излучения может быть существенно повышена за счет конструктивного совмещения петли и рамки. На рис. 6 а, б показаны варианты реализации рефлекторов.

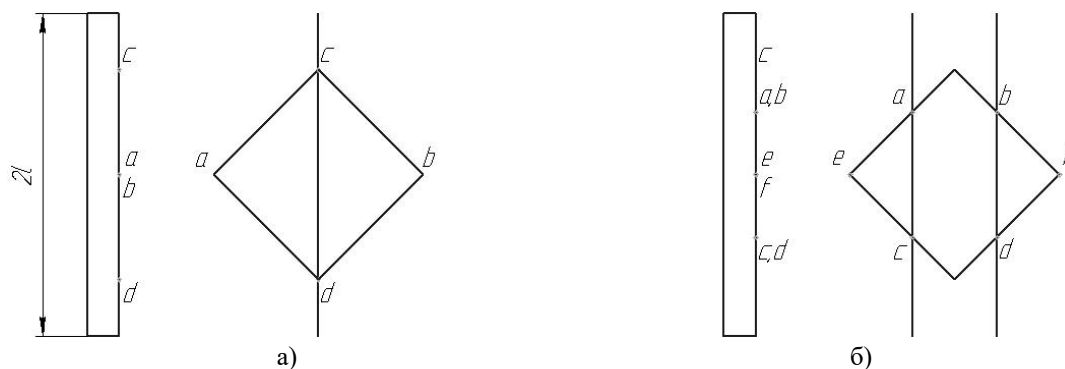


Рис. 6. Варианты конструктивного совмещения петли и рамки

Рефлектор, реализованный в поперечно-излучающей решетке [4] диапазона (390 – 470) МГц при КУ ≥ 14 dB, обеспечивает коэффициент защитного действия (КЗД) не менее 20 dB.

Особенно выигрывает конструкция антенн в области метрового диапазона. Так, в диапазоне частот (174 – 230) МГц рефлектор в виде 2-х петлевых элементов позволяет достичь КЗД не хуже 15 dB. При этом парусность антенны оказывается минимальной по сравнению с системой с плоским рефлектором.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в работе моделирование показало наличие эффекта снижения уровня обратного излучения в системе «линейный вибратор – петлевая рамка» по сравнению с парой взаимодействующих вибраторов в более широкой полосе частот. Показана возможность усиления данного эффекта в широкой полосе путем интеграции с поперечной рамкой.

Таким образом, петлевые элементы в качестве рефлектора в различных исполнениях дают возможность достичь достаточно хороших значений КЗД в широкой полосе частот при незначительной парусности.

Дальнейшее исследование в данной области представляет несомненный практический и научный интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кисмерешкин В. П. Телевизионные антенны для индивидуального приема. М.: Связь, 1976. 72 с.
2. А. с. 138277 Российская Федерация, МКИ Н 01Q 9/16 Диапазонная направленная антенна / Харченко К.П.
3. А. с. 191647 Российская Федерация, МКИ Н 01 Q 9/28. Диапазонная направленная антенна / В. П. Кисмерешкин, К. П. Харченко, П. П. Мартынов. № 1057654/26-9 ; заявл. 15.11.66 ; опубл. 26.01.67, Бюл. № 4.
4. Кисмерешкин В. П. Восьмиэлементная антенна. Омск, 1970.3 с. Информ. листок № 0220276.
5. А. с. 216803, МКИ Н 01 Q 15/14. Проволочный рефлектор / В. П. Кисмерешкин. № 1105187/26-9 ; заявл. 23.09.66 ; опубл. 26.04.68, Бюл. № 15.
6. Пат. 2113039, МКИ Н 01 Q 15/14. Широкополосный рефлектор / В. П. Кисмерешкин, Г. Н. Лобова. № 96122764 ; заявл. 28.11.96 ; опубл. 10.06.98.

УДК 621.396.962.25

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ГОМОДИННОГО ПРИЁМНОГО СВЧ ТРАКТА РЛС НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЛЧМ СИГНАЛОМ

М. Е. Ровкин¹, О. Ю. Сваровский², А. В. Христенко¹, М. В. Осипов¹, В. А. Хлусов¹

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Россия

²Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран», г. Томск, Россия

Аннотация – Рассмотрены особенности построения гомодинных приёмных трактов радиолокационных станций (РЛС) непрерывного излучения с широкополосным ЛЧМ сигналом 3-см и миллиметрового диапазона. Показано, что для увеличения динамического диапазона гомодинный приёмник таких РЛС должен иметь два преобразователя частоты. Первый преобразователь выполняется на основе GaAs

МИС, а второй с применением МИС по технологии Si или SiGe. Для такой схемы сделана оценка достижимого динамического диапазона, приведены полученные экспериментальные характеристики радиотрактов и полученные с их помощью радиолокационные изображения.

Ключевые слова: РЛС непрерывного излучения, миллиметровый диапазон, ЛЧМ сигнал, гомодинный приём

I. ВВЕДЕНИЕ

Развившиеся в последнее десятилетие цифровые методы формирования широкополосных (от 100 МГц и более) радиосигналов с высокими метрологическими характеристиками широко используются в трактах формирования сигналов излучения РЛС и радиолокационных датчиков высотометров и уровнемеров. Отсутствие компактных вычислителей не дает реализовать при обработке радиолокационного отклика, имеющего спектр шириной от 100 МГц и более, классический согласованный приём на основе цифрового конвольвера, использующего аппарата быстрого преобразования Фурье [1, разд. 8.29]. В этой ситуации возможно построение РЛС непрерывного излучения с широкополосным ЛЧМ сигналом, использующей известную гомодинную схему приёма отражённого сигнала в радиолокаторе, «когда генератор передатчика служит и местным гетеродином приёмника» [2, с. 257]. Такой приёмник относится также к приёмникам прямого преобразования, «являющимся архитектурой радиоприёмника, альтернативной широко распространённому гетеродину, фундаментальным отличием является основное усиление и фильтрация на частоте сигнала, а не на промежуточной частоте, как в гетеродине» [3].

II. КЛАССИЧЕСКИЙ ГОМОДИННЫЙ ТРАКТ И ЕГО НЕДОСТАТКИ

Ранее Томским АО «НПФ «Микран» была создана навигационная РЛС высокого разрешения (1,5 м по дальности) для малотоннажных речных судов. Разработка СВЧ тракта такой РЛС, использующей ЛЧМ сигнал с шириной спектра 100 МГц, начиналась с классической гомодинной схемы (рис.1) включающей цифровой формирователь сигнала ПЧ (ЦФПЧ), преобразовательно-усилительный тракт СВЧ (ТрПрдСВЧ), передающую (АПрд) и приёмную (АПрм) антенны, полосо-пропускающие фильтры СВЧ (ППФ СВЧ), усилитель мощности (УМ), делитель мощности (ДМ) гомодинный приёмный смеситель (ГСМ), видеофильтр сигнала биений (ВФ), видеоусилитель (ВУ) и тракт цифровой обработки сигналов (ТЦОС). Цифровой тракт обработки РЛ отклика РЛС «Река» реализует цифровой анализатор спектра сигнала биений, сформированного гомодинным смесителем приёмника. Он работает по алгоритму БПФ, оценивается по выборке из 8192 отсчётов, на которую наложено взвешивающее временное окно.

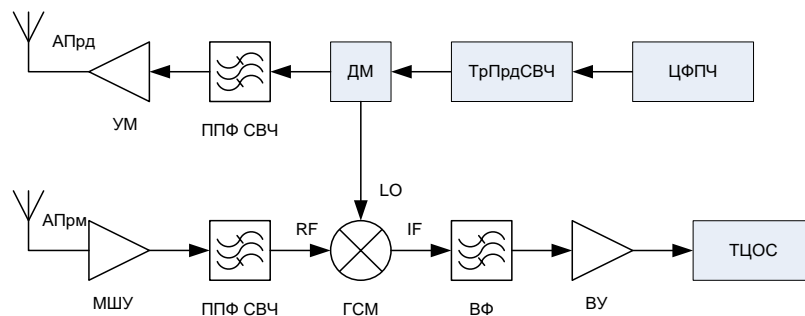


Рис. 1. Структура РЛС с ЛЧМ сигналом и гомодинной обработкой при приёме

Приёмник РЛС непрерывного излучения из-за невозможности применения ВАРУ должен иметь большой мгновенный динамический диапазон, целиком определяемый параметрами единственного приёмного смесителя. В работе такой РЛС нелинейность приёмника приводит к блокированию приёма при попадании в главный лепесток антенн РЛС мощных близко расположенных отражателей. Другой технической проблемой гомодинного приёмного тракта является относительно высокий коэффициент шума на низких (практически звуковых) частотах входного видеоусилителя: лучшие их образцы, например AD4981, имеют коэффициент шума около 5,5 дБ.

Отражённый совокупностью радиолокационных отражателей ЛЧМ сигнал на гомодинном смесителе ГСМ формирует сигнал биений, верхняя граница спектра которого при обработке определяет максимальную отображаемую дальность РЛС и не превышает единиц МГц. Нижнюю граничную частоту видеофильтра ВФ определя-

ем минимальную дальность (а значит, и мёртвую зону локатора), в РЛС «Река» она равна 1 кГц. Поэтому на чувствительность гомодинной приёмной системы отрицательно влияет низкочастотный (фликер) шум активных элементов приёмника, о чём упоминается в [4].

Макет гомодинного СВЧ тракта по схеме рис. 1 на современной элементной базе показал заметно (на 5 дБ) худший коэффициент шума, что вынудило увеличить усиление входного МШУ с расчётных 25 дБ до 35 дБ. По всем признакам, причина была в плохой работе гомодинного смесителя. Используемая в нём монолитная СВЧ микросхема НМС143 должна быть работоспособной на низких выходных частотах (от единиц кГц и выше), поскольку нормально она работает на активную нагрузку 50 Ом на выходных частотах от 30 МГц, и её выход не зашунтирован индуктивностью. Увеличение коэффициента усиления, в свою очередь, ухудшило перегрузочную способность приёмника, поскольку основное усиление приёмного тракта пришлось сосредоточить перед наиболее нелинейным элементом тракта – смесителем.

Поиск причины нештатной работы смесителя заставил обратиться к опыту авторов по построению супергетеродинного измерительного приёмника 3-см диапазона с низкой (50 кГц) промежуточной частотой, который применялся в 2005 г. в радиофизическом эксперименте [5]. В нём, как и в РЛС для речных судов 3-см диапазона, использовался смеситель на арсениде галлия (GaAs). Для получения расчётной чувствительности тогда пришлось поднять усиление входного МШУ измерительного приёмника с 30 дБ до 50 дБ. Это заставило провести анализ возможных причин, обратившись к физическим особенностям приборов на основе GaAs.

III. ПОИСК ВОЗМОЖНОЙ ПРИЧИНЫ ПОВЫШЕННОГО ШУМА СВЧ СМЕСИТЕЛЯ И ПУТЕЙ ЕГО ПРЕОДОЛЕНИЯ.

Анализ возможных причин указал на повышенный уровень шума на низких частотах (фликер-шум) GaAs-приборов, который, в отличие приборов на основе кремния (Si) или структур кремний-германий (SiGe), начинает превышать уровень теплового шума не с 2 кГц (в среднем), а с «нескольких десятков и даже сотен кГц, а по некоторым данным и с 20-50 МГц» [6]. Таким образом, гомодинный приёмник, использующий смеситель на GaAs, будет иметь повышенный уровень шума, а значит, и низкий динамический диапазон.

Повысить динамический диапазон можно, применив в приёмном тракте по схеме рис. 1, высокочастотные смесители на основе SiGe, которые хорошо работают при выходном сигнале (или промежуточной частоте) ниже 1 МГц, что было подтверждено прямым экспериментом. Однако такие смесители работают на выходных частотах не выше 8 ГГц, что делает невозможным их применение в 3-см или миллиметровом диапазоне. Но потребности рынка РЛС и РЛ сенсоров охранных систем диктуют переход в миллиметровые диапазоны длин волн. В 2014-2016 гг. ТУСУР совместно с АО «НПФ «Микран» выполнял работы по созданию системных радиолокационных сенсоров для охранных систем миллиметровых диапазонов (К, Ка и Е) с несущими частотами 24, 35 и 76 ГГц [7]. Поэтому для преодоления указанного недостатка для РЛС непрерывного излучения нами была разработана схема приёмно-передающего тракта гомодинного типа с двойным преобразованием частоты (рис. 2). Несмотря на наличие в нём каскадов промежуточной частоты, остаётся часть, осуществляющая усиление и фильтрацию в полосе сигнала, поэтому мы считаем такой тракт гомодинным.

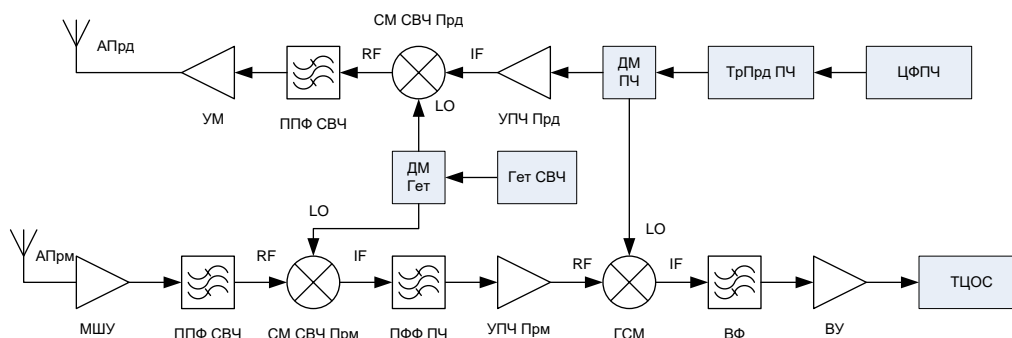


Рис. 2. Структура РЛС с приёмным трактом с двумя преобразованиями частоты

В схему РЛС введены СВЧ смесители приёма (СМ СВЧ Прм) и передачи (СМ СВЧ Прд), полосопропускающие фильтры ПЧ (ППФ ПЧ), усилители промежуточной частоты (ПЧ) $f_{ПЧ}$ приёмника (УПЧ Прм) и передатчика (УПЧ Прд), а также СВЧ гетеродин фиксированной частоты $f_{ГСВЧ}$ (Гет СВЧ) и делитель мощности его сигнала (ДМ Гет). Тракт формирования сигнала излучения на СВЧ заменён на более простой тракт формирования сигнала излучения на промежуточной частоте (ТрПрд ПЧ). В РЛС 3-см диапазона $f_{ПЧ} = 1.1$ ГГц, $f_{ГСВЧ} = 8.4$ ГГц, рабочая частота $f_0 = 9432$ МГц.

Важной особенностью новой схемы является двойное преобразование частоты и использование второго (выходного или гомодинного) смесителя, выполненного не по технологии GaAs, а на основе Si или SiGe. Первый же смеситель, специфичный для СВЧ диапазона, может быть на основе GaAs. При таком распределении функций каждый из смесителей решает свою задачу и работает в оптимальном в смысле расширения динамического диапазона режиме. СВЧ смеситель формирует сигнал высокой (порядка 1 ГГц) первой ПЧ, при этом его повышенный фликер-шум на низких частотах не сказывается. Переход в область нулевых частот осуществляет более высокодинамичный, но менее широкополосный второй (гомодинный) смеситель, имеющий низкий фликер-шум.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКОГО И МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ТРАКТОВ

Для сравнительной оценки динамического диапазона приёмной части классического (рис. 1) и усовершенствованного (рис. 2) трактов РЛС непрерывного излучения нами выполнялось моделирование коэффициента шума и уровня продуктов нелинейности третьего порядка. Оба тракта имели одинаковые СВЧ смесители (НМС143) и коэффициент шума МШУ ($N_{ш}=2.5$ дБ), а также одинаковый сквозной коэффициент передачи $G=34$ дБ. Выходной смеситель при втором преобразовании частоты использован типа LTC5585.

Показателем линейности трактов служит уровень продуктов интермодуляции третьего порядка. Проведённый с помощью пакета AWR Microwave Studio расчёт показал (см. рис. 3), что выходная точка компрессии при переходе от схемы рис. 1 к схеме рис. 2 возрастает с +20 дБм до +38 дБм.

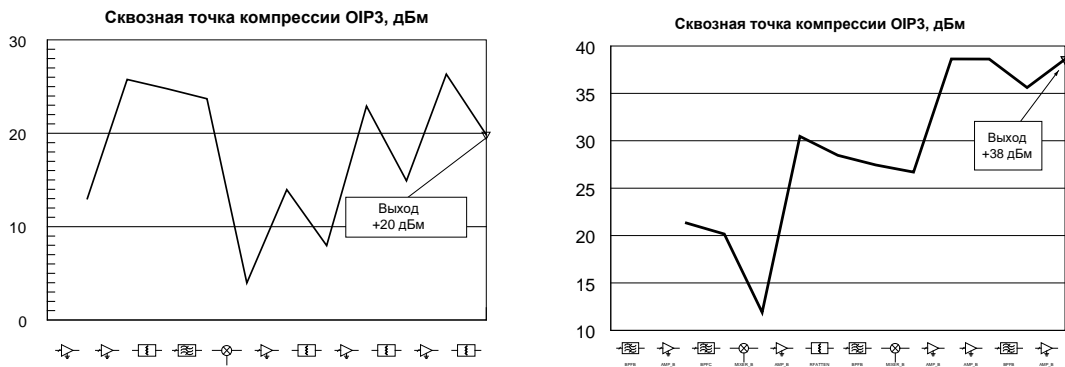


Рис. 3 – Результаты моделирования нелинейности третьего порядка гомодинных приёмных трактов с одним (слева) и двумя (справа) преобразованиями частоты .

Для номинальной выходной мощности тракта $P_{\text{вых. макс.}} = +10$ дБм расчётный уровень продуктов интермодуляции третьего порядка составит $IM3 = -40$ дБ для тракта с одним смесителем (рис.1) и $IM3 = -58$ дБ для тракта с двумя смесителями (рис. 2).

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Макетирование СВЧ тракта по схеме рис.2 и сравнение измеренных характеристик трактов, построенных по схемам рис.1 и рис.2, подтвердило сделанные расчёты нелинейности. На рис. 4 показаны спектры выходных сигналов этих приёмных трактов, построенные встроенным трактом ЦОС РЛС для двухчастотного входного сигнала с мощностью каждого тона – 24 дБм. Полная шкала АЦП, имеющего разрешение 16 двоичных разрядов, составляла +10 дБм, частотное разнесение тонов было выбрано равным 170 кГц. Тоновые СВЧ сигналы формировались двумя взаимно синхронизированными синтезаторами частоты Г7М-20А (АО «НПФ «Микран»).

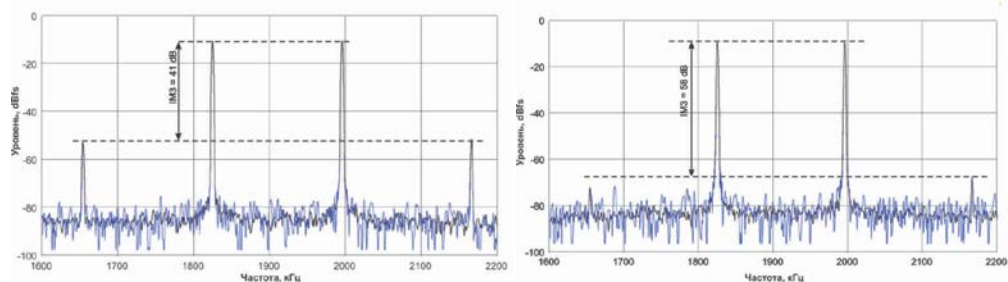


Рис. 4. Спектры выходного сигнала гомодинных приёмных трактов РЛС непрерывного излучения 3-см диапазона с одним (вверху) и двумя (внизу) преобразованиями частоты при их испытании двухтоновым сигналом мощностью – 24 дБм/тон. Коэффициенты усиления приёмника 34 дБ.

Из рис. 4 видно, что уровень продуктов интермодуляции снизился с -41 дБ у схемы рис.1 до -58 дБ у схемы рис.2, что хорошо согласуется с результатами расчёта на основе результатов численного моделирования нелинейности, приведёнными на рис. 3.

Для натурального сравнения эффективности схем, приведённых на рис. 1, 2, испытывались два выполненных по ним образца СВЧ тракта 3-см диапазона. Для этой цели они устанавливались в серийную РЛС «Река», развёрнутую в черте г. Томска на высоком (60 м над водой) берегу р. Томь рядом с корпусом РК ТУСУР (адрес ул. Вершинина, 47). При измерениях использовалось одинаковое технологическое программное обеспечение РЛС «Река». Сравнение полученных радиолокационных изображений двух РЛ сенсоров (Рис.5), имеющих в своём составе приёмники с одним или двумя преобразованиями частоты, указывает на преимущество образца, имеющего приёмник с двойным преобразованием частоты (рис.2).

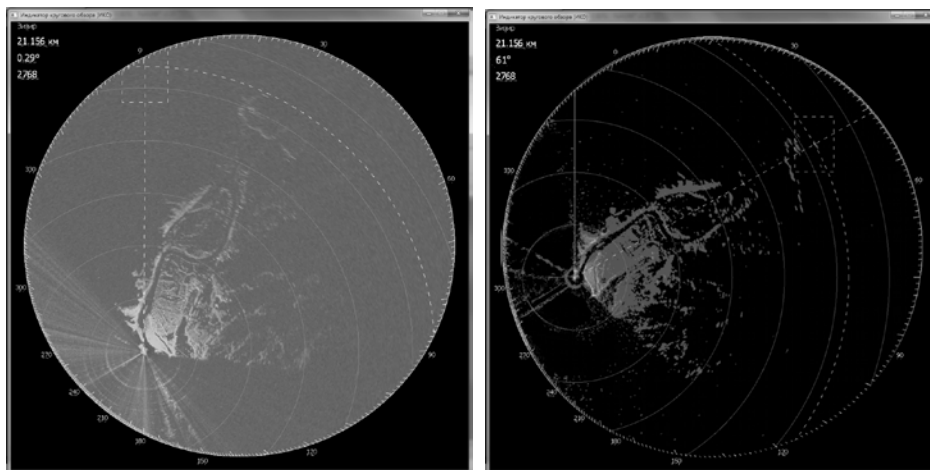


Рис. 5. Сравнение РЛ изображений двух РЛ сенсоров 3-см диапазона, имеющих приёмные тракты одним (слева) и двумя (справа) преобразованиями частоты

Из левого рис.5 видно, что приёмник с одним смесителем имеет секторную засветку в виде веера лучей из-за перегрузки приёмника отражениями от расположенных близко отражателей, что делает невозможным локацию во всём диапазоне дальностей определённых азимутальных положений антенной системы РЛС. Очевидно, что обычный (схема рис.1) имеет недостаточный для практического использования динамический диапазон. РЛ изображение с выхода тракта с двумя смесителями (рис.2), показанное на рис.5 справа содержит больше деталей, а признаки перегрузки наблюдаются только при направлении антенны РЛС на элементы близко расположенного (20–30 м) здания, обшитого стальным сайдингом. Поэтому такой тракт в настоящее время применяется в серийных РЛС и РЛ сенсорах, производимых АО «НПФ «Микран».

V. КОНСТРУКЦИЯ ГОМОДИННЫХ ПРИЁМНЫХ ТРАКТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Впоследствии по схеме с двумя преобразованиями частоты были модернизированы тракты РЛС «Река» и охранных сенсоров миллиметровых диапазонов. На рис.6 показан внешний вид СВЧ трактов РЛС «Река» X-диапазона и охранного РЛ сенсора Ka-диапазона кругового обзора, разработанных и изготовленных АО «НПФ «Микран» в 2016 и 2015 гг.

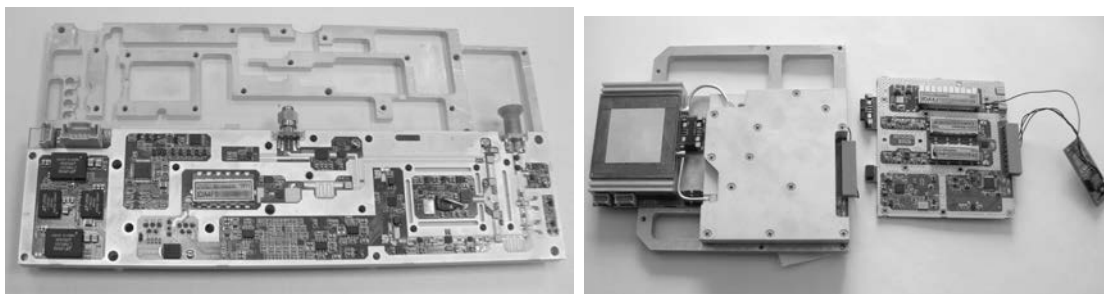


Рис. 6. Внешний вид приёмно-передающих трактов с расширенным динамическим диапазоном: РЛС «Река» 3-см диапазона (слева) и РЛ сенсора Ka – диапазона (справа).

Тракт СВЧ РЛС 3-см диапазона представляет печатный узел на многослойной плате из разнородных диэлектриков, помещаемый между двумя крышками, обеспечивающими электрогерметичность отдельных каскадов и тракта в целом. Тракт миллиметрового диапазона в дополнение к печатному узлу содержит модуль, выполненный по гибридной технологии.

Сейчас нами разрабатывается миллиметровая РЛС параллельного обзора верхней полусферы, предназначенная для беспойскового обнаружения беспилотных малоскоростных целей типа «дрон» (квадрокоптеров) с ЭПР от $0,01 \text{ м}^2$. Многоканальный приёмный тракт этой системы, работающей в миллиметровом диапазоне длин волн, также будет построен по схеме с двумя преобразованиями частоты, первый смеситель будет выполнен на GaAs СВЧ МИС, а второй – на SiGe.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена и реализована схема расширения динамического диапазона гомодинного приёмного тракта РЛС непрерывного излучения СВЧ (с несущей частотой от 9 ГГц и выше), заключающаяся в переходе от тракта с одним к тракту с двумя преобразователями частоты, причём входной СВЧ смеситель выполнен по технологии GaAs, а выходной смеситель по технологии Si или SiGe. Приведены расчётные и полученные характеристики нелинейности обычного и усовершенствованного приёмников, а также радиолокационные изображения, полученные с ними в составе РЛС 3-см диапазона на одной позиции при мощности излучения 1 Вт. Полученное расширение динамического диапазона на 16–18 дБ позволяет рекомендовать предложенное техническое решение для применения в гомодинных приёмниках радиолокационных сенсоров и микроволновых радиовысотометров с ЛЧМ сигналом, особенно миллиметровых диапазонов длин волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.577.21.0188.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radar handbook. 3rd ed / ed. by M. Skolnik. McGrawHill, 2008. 1352.
2. Справочник по радиолокации. Том 3. Радиолокационные устройства и системы / под ред. М. Сколника. М.: Сов. радио, 1979. 257 с.
3. Abid A. A. Direct-conversion radio transceivers for digital communications // IEEE J. Solid-State Circuits. 1995. Vol. 30, no. 12. P. 1399–1410.
4. Namgoong W., Meng T. H. Direct-conversion RF receiver design // IEEE Trans. Commun. 2001. Vol. 49, no. 3. P. 518–529.
5. Ровкин М. Е., Акулиничев Ю. П., Хлусов В. А., Ковалев В. Н., Бутько В. А., Павлова Л. В., Ваулин, И. Н., Пурик Д. В. Совместное измерение вертикальных профилей индекса рефракции и множителя ослабления сигнала 3-см диапазона над водной поверхностью // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Томск : ТУСУР, 2005. № 4. С. 61–67.
6. Шварц В. А. Усилители СВЧ на полевых транзисторах. М: Радио и связь, 1987. 200 с.
7. Разработка и организация высокотехнологичного производства твердотельных радаров миллиметрового диапазона с применением электронной компонентной базы собственной разработки и создание на этой основе комплексированных систем мониторинга выделенных пространственных зон / Описание проекта на сайте. URL: http://old.tusur.ru/ru/science/high-tech/projects/project_6/index.html

УДК 621.391.2

О ВЛИЯНИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИГНАЛОВ КВ МОДЕМОВ НА ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Ю. В. Романов
АО «ОНИИП», г. Омск, Россия

Аннотация – В докладе показано, что для любого типа КВ модемов повышение спектральной эффективности сигнала за границы порядка 1 бит/(с×Гц) приводит к снижению энергетической эффективности модема. Существенное повышение скорости передачи данных в КВ канале при сохранении энергетической эффективности возможно за счет расширения полосы сигнала. Показано, что традиционный для

распространенных КВ модемов режим с информационной скоростью передачи данных 9600 бит/с в полосе 3100 Гц уступает по энергетической эффективности варианту реализации этой же скорости в утроенной полосе частот от 14 до 40 раз по мощности. Предложено легализовать в РФ использование в КВ диапазоне форм сигнала с полосой до 40 кГц.

Ключевые слова: КВ модем, энергетическая эффективность, спектральная эффективность, полоса частот.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт общения с потребителями систем профессиональной КВ радиосвязи показывает, что в большинстве случаев у них отсутствует понятие о существовании таких показателей, как спектральная и энергетическая эффективность, соответственно, и об их взаимосвязи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель данного доклада – показать на конкретных примерах взаимосвязь между указанными показателями, а также предложить корректную методику для сравнения различных радиомодемов по указанным показателям применительно к реальным системам передачи данных.

Анализ будет осуществляться на уровне КВ радиомодема (далее – модема), т.к. в системе связи именно модем определяет рассматриваемые показатели. Под модемом будем понимать устройство или программу, осуществляющие преобразование сообщения в сигнал (в режиме передачи) и сигнала в сообщение (в режиме приема). Соответственно, в модеме может содержаться не только модулятор/демодулятор, но и кодер/декодер. Если не оговорено иного, то рассматривается модем для работы отраженной от ионосферы волной.

ТЕОРИЯ

Введем понятия спектральной и энергетической эффективности.

Под спектральной эффективностью понимают отношение информационной скорости передачи данных к требуемой для обеспечения этой скорости полосе частот [1, 2]. Соответственно, размерностью спектральной эффективности является бит/(с×Гц).

На скачковых трассах в КВ диапазоне в модемах с полосой стандартного телефонного канала (СТК) 3100 Гц, обычно [3], не используют скорости информационной передачи данных выше 9600 бит/с, соответственно, спектральная эффективность модема в этом случае составляет порядка 3,1 бит/(с×Гц).

Энергетическую эффективность в теоретических исследованиях оценивают отношением требуемой энергии на бит (E_b) к спектральной плотности мощности шума (N_0), но с практической точки зрения при работе с реальными модемами удобнее измерять отношение средних мощностей сигнала и шума (SNR – Signal-to-Noise Ratio) в полосе сигнала [2]. Далее при оценке модема как законченного продукта мы будем пользоваться именно практическим (инженерным) подходом, выражая соотношение сигнал/шум в децибелах (дБ).

Соотношением E_b/N_0 удобно пользоваться на этапе теоретических исследований, когда различные решения, например, виды модуляции, сравниваются умозрительно.

Какое бы из двух определений энергетической эффективности ни было выбрано, необходимо договориться о том, при какой вероятности ошибки будет определяться энергетическая эффективность.

Для корректности сравнения различных модемов необходимо использовать битовую вероятность ошибки (Bit Error Rate – BER), а не символьную, т.к. информационная емкость символа в различных модемах может различаться.

На рис. 1. приведена кривая помехоустойчивости одного из серийных отечественных модемов со слабым помехоустойчивым кодом в «плохом» (по ITU-R Rec. F.520) канале при скорости передачи данных 4800 бит/с.

Подобное поведение кривой помехоустойчивости в сложных многоручевых каналах характерно для всех модемов синхронной передачи данных без оценителя импульсной передаточной характеристики (ИПХ), широко распространенных в РФ.

Известен случай, когда при формировании ТТЗ на модем и оконечную аппаратуру описанная особенность не была учтена, в результате чего номинальная вероятность битовой ошибки модема и оконечной аппаратуры оказались несогласованными на порядок (5% и 0,5% по BER).

Компенсация указанной ошибки требует не менее чем десятикратного увеличения энергетики радиолинии, как следует из рис. 1.

На этом примере мы видим, что непонимание особенностей радиомодемов может привести к тому, что вместо передатчика мощностью 1 кВт придется ставить передатчик мощностью 10 кВт, либо добиваться аналогичного повышения энергетики радиолинии за счет более эффективных антенн.

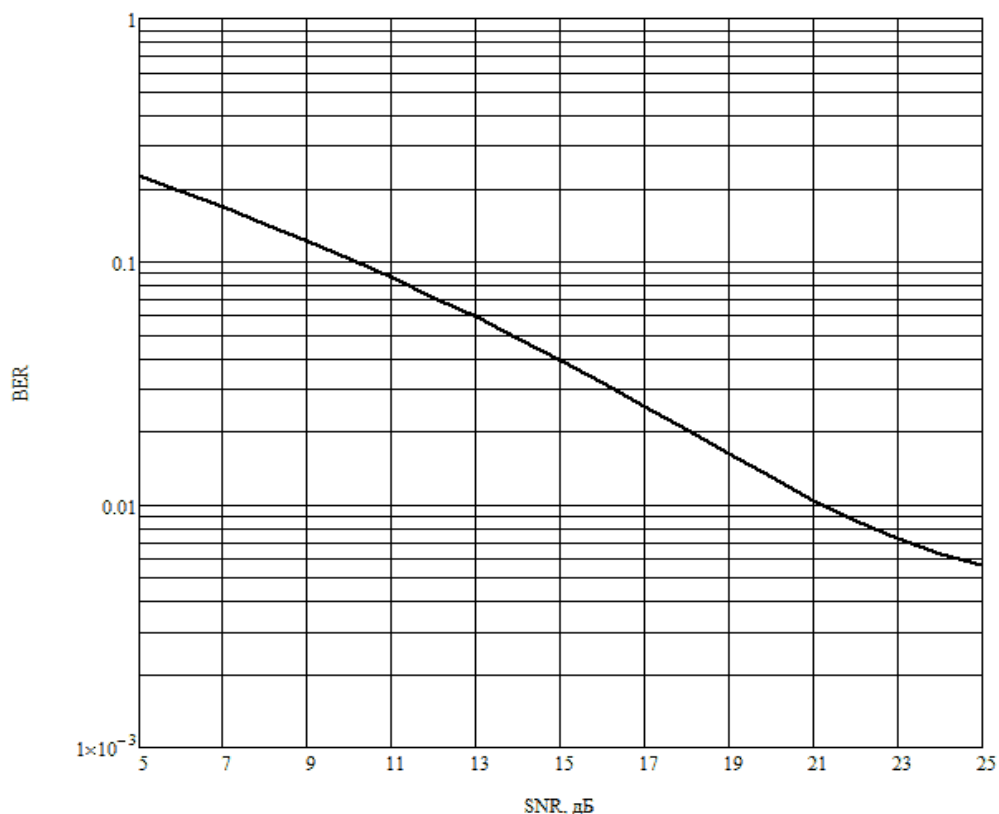


Рис. 1. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум

Традиционным для модемов передачи данных файлового типа является сравнение помехоустойчивости при уровне битовой ошибки 1×10^{-5} .

Чем больше размер блока данных, тем более мощный помехоустойчивый код можно использовать, получив больший энергетический выигрыш от кодирования. Соответственно, помехоустойчивость модемов корректно сравнивать при одинаковой длительности блока данных.

Сравнение помехоустойчивости различных модемов также необходимо производить при равных информационных скоростях передачи данных, т.к. потребителя интересует не абстрактная помехоустойчивость, приведенная к биту – E_b/N_0 , а передача данных с конкретной скоростью.

Если перечисленные выше подходы к корректному сравнению достаточно хорошо описаны в литературе, то влияние пик-фактора (*PAPR – Peak to Average Power Ratio*) сигнала на реальные системы передачи данных для многих не очевидно.

Пик-фактор – это отношение максимальной (пиковой) мгновенной мощности сигнала к его средней мощности. При таком определении пик-фактор немодулированной несущей составляет 3 дБ, постоянного тока – 0 дБ.

В некоторых источниках за пик-фактор 0 дБ принимают пик-фактор несущей, т.е. все значения оказываются на 3 дБ ниже, чем принятые здесь.

Вероятно, недооценка пик-фактора обусловлена разрывом между теорией и практикой. В теоретических трудах интересуются отношением средних мощностей сигнала и шума, а в реальных системах передачи данных у радиопередающего устройства ограничена не средняя излучаемая мощность, а пиковая.

Соответственно, если переходить с уровня модема на уровень системы связи, то необходимо учитывать еще один показатель модема – пик-фактор сигнала. Разница по этому показателю между различными модемами при различных скоростях передачи данных может превышать 10 дБ.

Особенно большой проигрыш по пик-фактору при переходе от форм сигнала с низкой спектральной эффективностью к формам сигнала с высокой спектральной эффективностью наблюдается в последовательных модемах. Это обусловлено тем, что в параллельных модемах вне зависимости от выбранной формы сигнала сама многоканальность обеспечивает уже достаточно большое значение пик-фактора. Таким образом, проблема пик-фактора актуальна для любых модемов, работающих в режимах с высокой спектральной эффективностью [4].

Условимся под энергетической эффективностью сигнала в узком смысле понимать помехоустойчивость, в широком смысле – совокупность помехоустойчивости и пик-фактора.

Таким образом, для корректного сравнения различных модемов по энергетической эффективности в контексте систем передачи данных необходимо:

- анализировать зависимость битовой (BER) (а не символьной) вероятности ошибки от соотношения сигнал/шум (SNR);
- использовать одинаковый порог по BER, соответствующий требованиям целевой системы (в нашем случае – 1×10^{-5});
- использовать одинаковый по длительности размер блока данных;
- использовать одинаковую информационную скорость передачи данных;
- учитывать пик-фактор сигнала.

Также можно оценивать влияние того или иного параметра конкретного модема на энергетическую эффективность, зафиксировав остальные параметры.

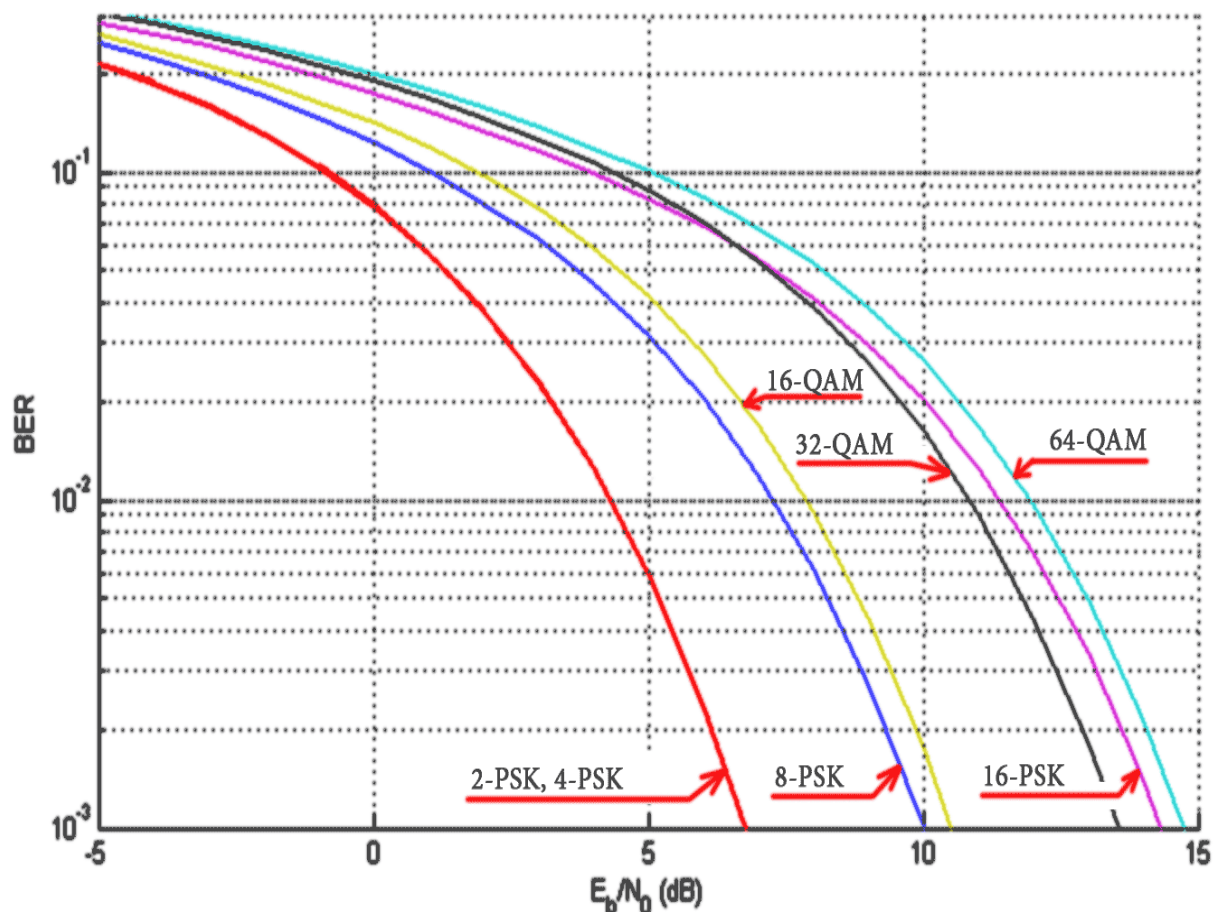


Рис. 2. Кривые помехоустойчивости для различных видов модуляции

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Наиболее существенным заблуждением многих пользователей относительно свойств модемов является представление о существовании линейной зависимости между потребляемой мощностью радиопередающего устройства и достижимой на реальной радиотрассе при работе в фиксированной полосе скоростью передачи данных.

Покажем теоретически, а потом и на конкретных примерах, что данное заблуждение приводит к достаточно большим погрешностям при оценке возможностей реальных систем передачи данных.

Следует отметить, что реальные системы передачи данных ограничены по полосе сигнала, соответственно, рост скорости передачи данных не может быть обеспечен без увеличения спектральной эффективности сигнала.

На рис. 2 показана помехоустойчивость различных видов модуляции при когерентном приеме в канале с постоянными параметрами и АБГШ [5].

Мы видим, что в случае с многопозиционными сигналами фазовой манипуляции помехоустойчивость не снижается только при переходе от однократной к двухкратной манипуляции. Дальнейшее повышение спектральной эффективности за счет увеличения позиционности сигнала приводит к падению помехоустойчивости.

Если сравнивать многопозиционные сигналы фазовой манипуляции и многопозиционные сигналы квадратурной амплитудной манипуляции (КАМ), то при числе позиций более 8 фазовая манипуляция заметно проигрывает квадратурной амплитудной манипуляции, по причине чего сигналы фазовой манипуляции с числом сигнальных точек 16 или более практически не используются. Физически это объясняется большим евклидовым расстоянием между сигнальными точками в случае с КАМ, т.к. сигнальные точки расположены не на окружности, а на плоскости, что позволяет более эффективно использовать площадь.

Отметим, что квадратурная амплитудная манипуляция является частным случаем амплитудно-фазовой манипуляции (АФМ, APSK – Amplitude and Phase-Shift Keying). Распространенность КАМ обусловлена удобством в реализации, хотя в плане помехоустойчивости известны и более эффективные не квадратные сигнальные созвездия. При этом во многих зарубежных источниках не различают данные виды манипуляции, используя одно обозначение – QAM.

Также нетрудно заметить, что повышение спектральной эффективности на каждый следующий бит в секунду на Герц в пределах одного вида модуляции требует примерно одинакового увеличения соотношения сигнал/шум [1, 2], но относительный прирост спектральной эффективности сигнала при этом все меньше и меньше. Соответственно, чем выше текущая спектральная эффективность, тем дороже, с энергетической точки зрения, обходится ее повышение.

Если говорить про выпускаемые серийно КВ модемы, то в полосе 3100 Гц наиболее выгодные энергетически сигналы однократной и двукратной фазовой манипуляции позволяют обеспечить информационные скорости передачи данных порядка 1200...1600 и 2400...3200 бит/с соответственно.

Сигналы трехкратной фазовой манипуляции проигрывают уже не только по пик-фактору, но и по помехоустойчивости, обеспечивая в модемах скорости информационной передачи данных до 3200...4800 бит/с.

Начиная со скоростей порядка 4800...6400 бит/с разработчики вынуждены переходить к сигналам амплитудно-фазовой манипуляции, обладающим не только меньшей помехоустойчивостью, но и заметно большим пик-фактором [1].

В широко распространенных системах передачи данных с полосой 3100 Гц для работы на скачковых трассах не использовались модемы с информационной скоростью выше 9600 бит/с (которой соответствует 64-QAM сигналы), в т.ч. и по причине того, что требуемое для их работы соотношение сигнал/шум не обеспечивалось уже на выходе радиопередающего устройства (РПДУ), вносящего, недопустимые с точки зрения многопозиционных сигнальных созвездий искажения. Искажения, воспринимаемые модемом как влияние шума, возникают за счет внутриполосных интермодуляционных искажений и паразитной амплитудной манипуляции в РПДУ.

Внедрение в радиопередающие устройства технологии цифровых преобразования (линеаризации) позволяет снизить уровень нелинейных комбинационных искажений третьего порядка приблизительно до минус 50...55 дБ относительно мощности двухтонового испытательного сигнала в пике огибающей (PEP). При работе с высокоскоростным модемом это позволяет ожидать увеличения модемом оценок соотношения сигнал/шум на выходе РПДУ до значений порядка 50 дБ [6], соответственно, появляется возможность использования в модеме сигналов с большой кратностью манипуляции – порядка 2048...4096-QAM.

Рассмотрим энергетическую эффективность в узком и широком смысле на конкретных примерах, отталкиваясь от требований к последовательным модемам действующего стандарта MIL-STD-188-110C.

Для блока данных длительностью 9,6 секунды и порога по BER на уровне 1×10^{-5} стандартом предписаны указанные в табл. 1 требования к помехоустойчивости.

ТАБЛИЦА 1
ТРЕБОВАНИЯ К ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ,
ОЦЕНКИ ПИК-ФАКТОРА И ПОТРЕБНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Скорость, бит/с		1200	2400	4800	6400	8000	9600	19200*
Модуляция		2-PSK	4-PSK	8-PSK	16-QAM	32-QAM	64-QAM	4096-QAM
SNR, дБ	АБГШ	5	6	13	16	19	21	36*
	поог	10	11	19	23	27	31	–
Пик-фактор**		3	4	5	6	6	8	13*
P, Вт	АБГШ	0,8	1,3	7,9	20	40	100	10 000*
	поог	2,5	4,0	31	100	250	1000	–

*результаты для модема MDM40K0

**оценочные значения

Приведенные курсивом параметры режима со скоростью 19200 бит/с соответствуют модему разработки ОНИИП, т.к. подобный режим в известных зарубежных модемах отсутствует.

При работе с реальной радиопередающей аппаратурой необходимо учитывать пик-фактор сигнала, соответственно, приведем и его оценки для выбранных режимов. В стандарте требования к пик-фактору не приводятся, по этой причине воспользуемся оценками, приведенными в табл. 1.

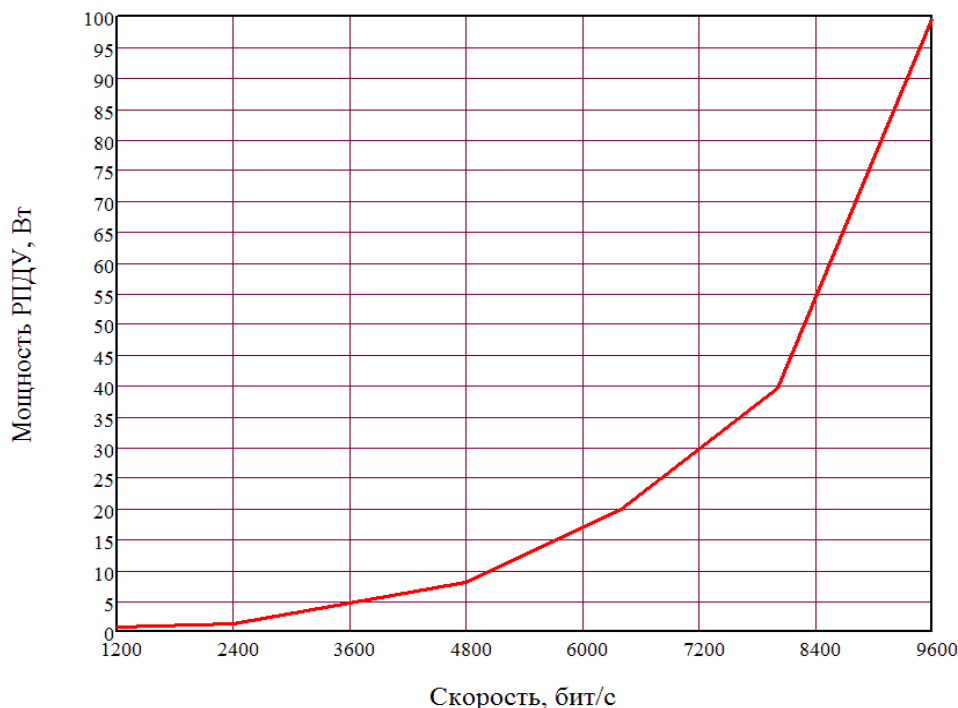


Рис. 3. Зависимость потребляемой мощности РПДУ от скорости передачи данных для канала с постоянными параметрами и АБГШ

Для перехода от абстрактных значений SNR и пик-фактора к потребляемой номинальной мощности РПДУ используем полученные в ходе неоднократных испытаний на трассе Омск–Москва оценки [7].

На рис. 3 в графическом виде приведены полученные выше результаты для канала с постоянными параметрами и АБГШ. В контексте трассы Омск – Москва данный случай можно считать соответствующим работе в крайне узкой области частот вблизи МПЧ, где отсутствует многолучевость.

Как мы видим, при значениях спектральной эффективности модема выше приблизительно 1 бит/(с×Гц) зависимость носит нелинейный характер, и чем выше спектральная эффективность модема, тем дороже, с энергетической точки зрения, обходится ее дальнейшее повышение.

На рис. 4 приведены результаты для «плохого» канала, т.е. канала, где наблюдается два независимо замирающих по релеевскому закону луча с равной средней мощностью, задержка между лучами составляет 2 мс, скорость замираний 1 Гц.

Мы видим, что нелинейный характер зависимости в более сложном канале выражен еще сильнее, соответственно, повышение спектральной эффективности обходится еще дороже.

Для того, чтобы показать анализируемую закономерность более ярко, рассмотрим требования к энергетике для режимов со скоростью до 19200 бит/с включительно в полосе 3,1 кГц и в более широких полосах (см. рис. 5).

Современные радиопередающие устройства мощностью 1 кВт и 5 кВт разработки ОНИИП обеспечивают достаточно низкий уровень нелинейных искажений, чтобы реализовать режим со скоростью 19200 бит/с в полосе 3100 Гц для канала с постоянными параметрами и АБГШ.

В качестве альтернативы рассмотрим ситуацию, когда увеличение скорости передачи данных обеспечивается не за счет наращивания кратности манипуляции сигнала в полосе СТК, а за счет расширения полосы сигнала с 3 кГц до 24 кГц. В этом случае требуемая мощность, очевидно, будет увеличиваться прямо пропорционально полосе и скорости (т.к., с точки зрения модема, происходит только расширение шумовой полосы, вид модуляции не меняется и в данном примере соответствует скорости 2400 бит/с в полосе СТК).

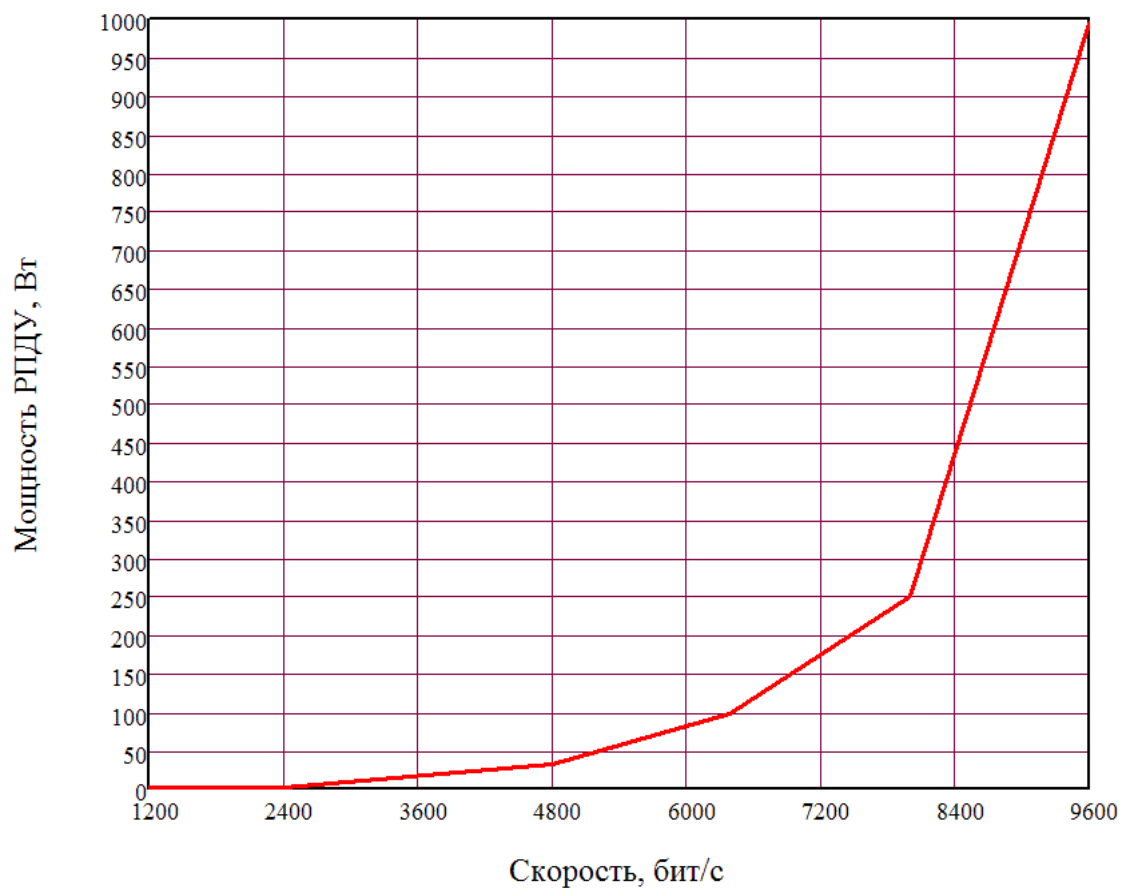


Рис. 4. Зависимость потребной мощности РПДУ от скорости передачи данных для «плохого» канала

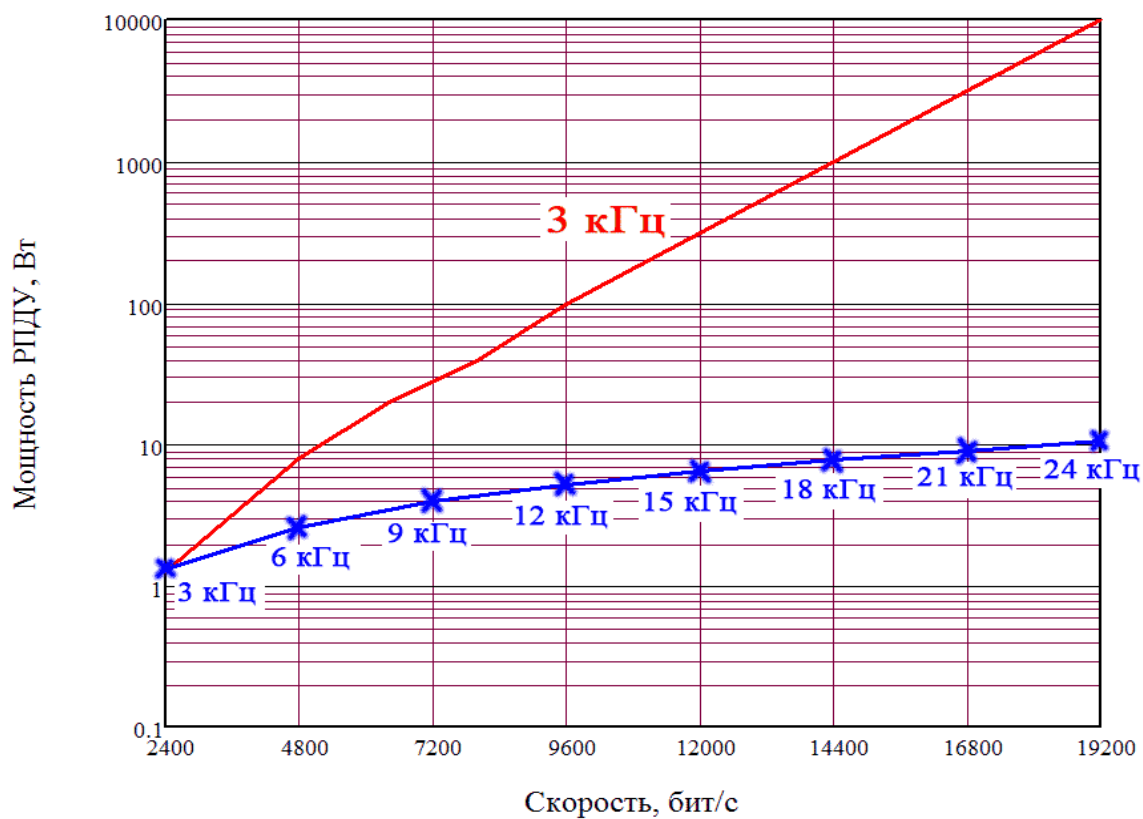


Рис. 5. Зависимость потребной мощности РПДУ от полосы и скорости передачи данных для канала с постоянными параметрами и АБГШ

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, повышение спектральной эффективности сигнала возможно только за счет снижения его энергетической эффективности вне зависимости от типа модема.

При работе в полосе стандартного телефонного канала 3100 Гц падение энергетической эффективности наблюдается со скоростями порядка 3200 бит/с. Вероятно, именно это в совокупности с возрастающими требованиями к пропускной способности канала связи обусловило введение рядом зарубежных стран в высокоскоростные КВ модемы форм сигнала с полосой до 24 кГц. Учитывая сложившуюся исторически поддержку отечественной аппаратурой сигналов с полосой до 40 кГц (*ранее – по входу ПЧ 128 кГц, сейчас – по цифровому входу*), нами предлагается легализовать в РФ использование соответствующих форм сигнала.

Реализация скорости передачи данных 19200 бит/с в полосе 3100 Гц на базе современных технических средств возможна при работе земной волной, но для рассмотренных модемов энергетический проигрыш данного решения составляет порядка 1000 раз по мощности относительно расширения полосы до 24 кГц.

Традиционный для распространенных КВ модемов режим с информационной скоростью передачи данных 9600 бит/с в полосе 3100 Гц уступает по энергетической эффективности варианту реализации этой же скорости в утроенной полосе частот в рассмотренных каналах от 14 до 40 раз по мощности.

Источник финансирования: АО «ОНИИП»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. Пер. с англ. / под ред. В.И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
3. Пукса Д. О., Романов Ю. В. Результаты трассовых испытаний высокоскоростного КВ радиомодема разработки ОАО «ОНИИП» // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 11. С.19–25.
4. Гиршов В. С. Влияние пик-фактора на эффективность высокоскоростной одноканальной передачи при ограниченной пиковой мощности и полосе пропускания // Радиотехника. 1991. № 7. С. 46–48.
5. Bit Error Rate (BER). Theoretical Results. URL: <http://www.mathworks.com/help/comm/ug/bit-error-rate-ber.html> (дата обращения: 01.11.2015).
6. Богданов А. В., Кузлякина С. И., Пукса Д. О., Романов Ю. В. Об оптимизации требований к передающим комплексам радиолиний высокоскоростной передачи данных диапазона ДКМВ // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 7. С. 10–15.
7. Пукса Д. О., Романов Ю. В. Результаты трассовых испытаний адаптивной КВ радиолинии высокоскоростной передачи данных файлового типа на базе радиомодема с полосой сигнала до 40 кГц // Техника радиосвязи. 2015. № 4(27). С. 14–20.

УДК 004.056

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
В ИЗМЕНЕНИИ ОЦЕНОК ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ
В ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

И. И. Семенова, Ю. М. Монахов, М. Ю. Монахов

Владимирский государственный университет

имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Муром, Россия

Аннотация – В работе рассматривается базовая модель управления процессами обеспечения достоверности информации (ОДИ) в информационно-телекоммуникационной системе (ИТКС), учитывающая изменения во времени/темпоральность оценок показателей достоверности информационных ресурсов, а также циркуляцию информационных ресурсов в системе в условиях множества дестабилизирующих факторов. В работе показано решение одной из задач, вытекающее из условий работы ИТКС, а именно методика оценки влияния операций преобразования данных на оценки показателей достоверности информации.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная система (ИТКС), достоверность информации, угрозы достоверности информации, оценка показателей достоверности.

I. ВВЕДЕНИЕ

В любой аналитической работе, от формирования финансовых отчетов, справок, аудита, проведения маркетинговых исследований и прочих областях вплоть до информационной разведки, естественной и первоочередной задачей является задача получения достоверной информации, на основе которой делаются прогнозы и принимаются решения.

В различных классах автоматизированных систем, обобщенно в информационно-телекоммуникационных системах (ИТКС), существует широкий спектр методов проверки достоверности информации, полученной с датчиков, но большинство из них рассчитано на определение явной неисправности, кроме того, на текущий момент большинство систем не рассчитано на действия в условиях недостоверной информации [1].

Современные предприятия и компании по проектированию автоматизированных систем различных классов отмечают важность обеспечения качества информации, поступающей и циркулирующей в системах. В аналитическом обзоре [2] по моделям качества данных и информации показано, что 60% опрошенных фирм (500 средних зарубежных компаний с годовым объемом продаж более 20 млн. у.е.) испытывают проблемы с качеством данных. Одним из комплексных показателей качества информации является достоверность, подходы к определению сути которой в различных работах несколько разнятся.

II. ОБЗОР РАБОТ ПО ТЕМАТИКЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Так, в работе [3] показано, что суждение о степени достоверности информации со стороны пользователей в целом основано на когнитивной оценке. Факторы, влияющие на суждения, определяются, с точки зрения характеристик информационных ресурсов, характеристик источников, знания, ситуации и общего предположения.

В [4] отмечается, что достижение требуемого уровня достоверности является более сложной и широкой задачей, чем обеспечение надежности функционирования средств обработки информации.

Авторы [5], исследующие средства поиска и исправления ошибок при обработке информации в вычислительных системах, показывают, что использование надежных и дорогостоящих хранилищ данных не решает основную проблему низкой достоверности данных.

При том что существует широкий спектр исследований по различным аспектам качества информации и ее достоверности, остается потребность в методологии оценки достоверности информации, общей для различного вида ИС, позволяющей обеспечить базу развития информатизации общества [6–8].

Одним из основных ограничений существующих подходов к оценке достоверности данных является их специализация по конкретным вопросам или условиям [9].

Методы оценки достоверности информации можно разделить на две большие группы: эвристические (используемыми аудитором) и формальные (оперирующие моделями ИР, ИП и ИС) [10].

Подходы к оценке достоверности данных на примере баз и хранилищ данных основаны на анализе отношений как граф «сущность–связь», где прямые и косвенные отношения соответствуют путям в графе [11].

В то время как обычные ошибки в базах и хранилищах данных, такие как несуществующие индексы, могут быть обнаружены и исправлены с помощью традиционных инструментов очистки данных, множество ошибок, обычных для производственного процесса, не могут быть решены. Решением проблемы может служить матрица качества в задачах классификации интеллектуального анализа данных [12].

Поиск недостоверных данных даже при наличии их высокой структуризации и обозначенных взаимосвязях требует использования широкой совокупности методов: профилирование данных [13], нечеткий анализ [14], интеллектуальный анализ [15] и др.

В связи с тем что исправление недостоверных данных, которые уже были внесены в базы и хранилища данных и использованы, вызывает значительные затруднения в связи с распространением ошибок. Следовательно, как отмечают авторы [6], основное направление повышения достоверности должно быть ориентировано на процессы ввода, изменения и преобразования данных.

Общая модель оценки достоверности данных в системах принятия решений должна отражать исследование потоков данных с измерением ряда параметров на этапах сбора, ввода, обработки, хранения, передачи и представления информации. Модель должна давать представление о возможных ошибках во множестве промежуточных и конечных результатов. При этом должно быть учтено распространение и изменение ошибок различных типов [16].

Кроме того, актуальность приобретает проблема оценки достоверности информации в условиях множества «помех» – дестабилизирующих факторов, оказывающих влияние на достоверность информации в ИТКС, не вписывается лишь в классы отказов, сбоев и ошибок аппаратно-программных средств и операторов [16–18]. Достоверность информации в современных ИТКС не может быть обеспечена простым включением в компоненты системы соответствующих элементов, процесс обеспечения достоверности должен быть непрерывным и управляемым [19, 20].

Таким образом, в данной работе рассматривается базовая модель управления процессами ОДИ в информационно-телекоммуникационной системе, учитывающая изменения во времени/темпоральность оценок показателей достоверности информационных ресурсов, а также циркуляцию информационных ресурсов в системе в условиях множества дестабилизирующих факторов. В работе показано решение одной из задач, вытекающих из условий работы ИТКС, а именно методика оценки влияния операций преобразования данных на оценки показателей достоверности информации.

III. БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОДИ

Средой обеспечения достоверности информации и объектом исследования является информационно-телекоммуникационная система (ИТКС) – совокупность информационных ресурсов (ИР), средств вычислительной техники, телекоммуникаций, программного обеспечения и персонала, рассматриваемая как единое целое и предназначенная для того, чтобы обеспечивать потребителей (пользователей) надлежащим информационным обслуживанием.

В работе [21] показано, что компонентами модели управления достоверностью ИР могут быть следующие: информационные ресурсы; источники информации; угрозы достоверности информации; источники угроз достоверности информации; цели злоумышленников; функции обеспечения достоверности информации; меры обеспечения достоверности информации; средства обеспечения достоверности информации; показатели достоверности информации. А также принято, что в ИТКС циркулируют информационные ресурсы четырех типов: IR_1 – исходные данные, полученные на хранение и обработку от источников информации (включая потребителей и взаимодействующих ИТКС); IR_2 – производные данные, то есть данные, полученные в ИТКС в процессе переработки исходных и производных данных; IR_3 – программы, используемые для обработки данных, организации и обеспечения функционирования ИТКС; IR_4 – нормативно-справочные и служебные данные.

В работе [21] показана концептуальная схема процесса управления достоверностью информации в ИТКС в условиях информационного противоборства. Пример схемы для одного ИР представлен на рисунке 1.

На схеме модель ИР представлена автоматом: преобразователями $F^{(1)}$ и $F^{(2)}$, а также модулем, позволяющим хранить идентификатор достоверности (ИД) – текущие значения показателей – память состояния (ПС) достоверности ИР. Преобразователь $F^{(1)}$ реализует функцию переходов к новому состоянию ИД – $P(t+1)$ в зависимости от его текущего состояния $P(t)$, состояния среды $U(t)$ и воздействия $X^{(1)}(t)$: $P(t+1)=F^{(1)}\{P(t),U(t),X^{(1)}(t)\}$.

Оценку идентификатора достоверности $P^*(t)$ для очередного шага выработки управляющих воздействий получают по результатам «измерения» показателей $P(t)$. Данная процедура инициируется контролирующим воздействием $X^{(2)}(t)$: $P^*(t) = F^{(2)}\{P(t), X^{(2)}(t)\}$.

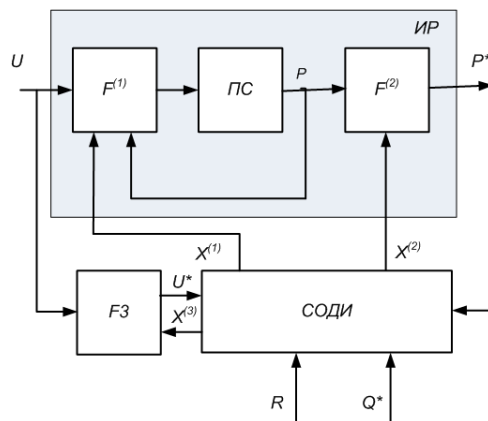


Рис. 1. Процесс управления достоверностью ИР

Вид функции выходов (преобразователь $F^{(2)}$) во многом определяется способом и методикой контроля (измерения) показателей ИД. Входы автомата – управления $X \in D$ ($X^{(1)}$ и $X^{(2)}$) вырабатывает управляющее устройство – СОДИ согласно выбранному из множества известных Φ алгоритму управления $\varphi \in \Phi$ (стратегии

достижения конкретной цели Q^*), выделяемых ресурсов R , полученной информации о состоянии среды U^* и оценки состояния объекта P^* : $X = \varphi(Q^*, P^*, U^*, R)$.

Информацию о состоянии внешней среды $U(t)$ для очередного шага выработки управляющих воздействий доставляют «датчики», осуществляющие функциональное преобразование $F^{(3)}$, в виде измеренных значений $U^*(t)$. Контроль осуществляется в соответствии с воздействием из $X^{(3)}$: $U^*(t) = F^{(3)}\{U(t), X^{(3)}\}$.

Модель управления достоверностью множества информационных ресурсов строится из комплекса взаимодействующих блоков, общая структура которых описана выше. «Функционирование» модели объекта описывается системой:

$$\begin{cases} P_1(t+1) = F_1^{(1)}[P_1(t), U_1(t), \dots, U_M(t), X_1^{(1)}(t)], \\ \dots \\ P_N(t+1) = F_N^{(1)}[P_1(t), U_1(t), \dots, U_M(t), X_N^{(1)}(t)]. \end{cases}$$

где $P_1(t), \dots, P_N(t)$ – текущие «состояния» ИР – значения показателей индикаторов достоверности; $U_1(t), \dots, U_M(t)$ – множество текущих значений параметров факторов, дестабилизирующих устойчивое функционирование ИТКС и приводящих к снижению показателей достоверности.

В данной работе достоверность определяется как множество оценок аутентичности, полноты, актуальности, целостности $\{D_A, D_C, D_T, D_I\}$ [22]. Следовательно, для каждого ИР будет $P_1(t) \equiv D_A(t), P_2(t) \equiv D_C(t), P_3(t) \equiv D_T(t), P_4(t) \equiv D_I(t)$.

Для возможности оперирования множествами оценок аутентичности, полноты, актуальности, целостности необходимо либо в базах данных и хранилищах самой ИТКС добавить атрибуты к каждому ИР, которые будут хранить оценки либо организовывать самостоятельное хранилище системы обеспечения достоверности информации в ИТКС. Следовательно, хранилище концептуально – это область памяти, или выделенный сервер, или распределенная система (в зависимости от последующего выбора архитектурного решения на логическом и физическом уровнях), которая позволяет организовать процессы управления данными о состоянии ИР в ИТКС и оценках критериев достоверности ИР с учетом истории изменений этих состояний. Другими словами, хранилище должно быть темпоральным и/или содержать в себе механизмы управления версиями.

IV. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО ПОВЕДЕНИЮ ОЦЕНОК ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОСТОВЕРНОСТИ

Как показывают наблюдения, значение показателя актуальности ИР обратно пропорционально частоте обновления ИР. Следовательно, при выполнении алгоритмических операций над информационными ресурсами с условно различными периодами снижения значения показателя актуальности следует учитывать подобную относительность и хранить подобный параметр в хранилище ОДИ. Пример показан в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

ПРИМЕР ВОЗМОЖНОЙ ГРАДАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ АКТУАЛЬНОСТИ ИР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА ИР

Условная оценка изменений ИР	Примеры типов ИР	Условная частота изменений в ИР
не изменяется	справочные данные, фундаментальные для отрасли	раз в несколько десятилетий
крайне редко изменяется	типовые стандарты	раз в десятилетие, в несколько лет
редко изменяется	типовые регламенты	раз в несколько лет, в год
не часто изменяется	годовая отчетность	раз в год, несколько раз в год
изменяется	отчетность в течение года	раз в месяц, несколько раз в месяц
часто изменяется	отчетность квартальная, месячная и пр.	раз в день, в несколько дней
очень часто изменяется	параметры протекающих технологических процессов	несколько раз в день

Примером возможной функции затухания/снижения значения показателя актуальности ИР во времени может быть $D_T^{IR}(t) = D_T^{IR}(0) - t / (t_{D_T}^{IR} \cdot (t_{D_T}^{IR} - t))$, где $t = iif(t < t_{D_T}^{IR}; t; t_{D_T}^{IR} - 1)$ – время в днях, на момент которого пересчитывается значение актуальности информационного ресурса ИР; $t_{D_T}^{IR}$ – период в днях затухания/снижения

оценки условно до 0; $D_T^{IR}(0)$ – установленная оценка в момент t_0 . Либо $D_T^{IR}(t) = D_T^{IR}(0) - e^{-\lambda \cdot (t_{D_T}^{IR} - t)}$, где λ – коэффициент, задающий кривизну (для каждого класса ИР по актуальности необходимо исследовать область допустимых значений λ).

Критерии полноты, аутентичности и целостности имеют иную природу. В ходе работы алгоритмов, если в операциях над данными входными являются несколько ИР с различными оценками полноты, аутентичности и целостности, то исходя из пессимистичного прогноза, выходной результат будет иметь значение оценки минимальное из всех входных.

Кроме того, как показывает практика, на результат влияет такой класс операторов, как ЕС-ЛИ... (антецеденте). Ошибки первого и второго рода данного класса операторов также понижают оценки полноты, аутентичности и целостности полученных результирующих данных в ходе выполнения операций в блоке ... ТО... (в консеквенте).

Учитывая тот факт, что любой алгоритм можно представить как последовательность операторов типа ЕС-ЛИ... ТО..., опытным путем, анализируя классы различных алгоритмов, было выявлено множество типовых атомарных правил для антецедентов (табл. 2) и определено, влияют ли ошибки первого и второго рода данных типовых антецедентов на оценки полноты, аутентичности и целостности полученных результирующих данных в ходе выполнения операций в блоке ... ТО... (в консеквенте).

В табл. 2 плюсом обозначается влияние правила на оценку, минусом – отсутствие влияния соответственно.

ТАБЛИЦА 2

СВЯЗЬ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ D_C , D_I , D_A И ТИПАМИ АТОМАРНЫХ АНТЕЦЕДЕНТОВ

Типы атомарных правил для посылки (антецедента или условия ЕСЛИ)	Полнота, D_C	Целостность, D_I	Аутентичность, D_A
Отношение принадлежности (множество А включено в множество В) $A \subseteq B \Leftrightarrow \forall a \in A : a \in B$ или Отношение принадлежности (множество А строго включено в множество В) $A \subset B \Leftrightarrow \forall a \in A : a \in B, A < B $	+	+	+
Отношение принадлежности элемента множеству $A = \{ a_1, \dots, a_i, \dots, a_N \} \Leftrightarrow \forall a_i \in A, i = \overline{1..N}$ Элемент b принадлежит множеству А: $b \in A \Leftrightarrow \exists a_i \in A : (a_i \equiv b \wedge \wedge A = \{ a_1, \dots, a_i, \dots, a_N \}, i = \overline{1..N})$	+	+	+
Множества равны (эквивалентны) без учета отношения порядка $A = B \Leftrightarrow (\forall a \in A : a \in B) \wedge (\forall b \in B : b \in A)$	+	+	-
Отношение порядка внутри множества или упорядоченные множества (C, \leq) $C \equiv (C, \leq) \Leftrightarrow \forall x, y \in C : (x < y \vee x = y)$	-	+	-

V. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ОПЕРАЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ НА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ

В табл. 2 посылки (антецеденты), которые могут содержать одно или несколько атомарных правил, связанных логическими операторами И, ИЛИ, НЕ, обозначим как $q_j \in Q, j = \overline{1..J}$, Q – все множество посылок в алгоритме. Операции над атомарными данными и ИР в консеквенте (следствии) j -го антецедента будем обозначать

как $O_j = \{o_1, \dots, o_n, \dots, o_N\}, n = \overline{1..N_j}, j = \overline{1..J}$, N_j – количество операций над данными в j -ом консеквенте алгоритма. Операции в j -ом консеквенте, которые выполняют переход на другой антецедент, во множество O_j не включаются.

Для оценки вероятностей ошибок первого и второго рода для учета их в процессах изменения значений критериев полноты D_C , целостности D_I и аутентичности D_A каждого обрабатываемого и преобразуемого ИР при работе конкретного алгоритма необходимо провести экспертную оценку качества работы алгоритма по следующей методике:

Шаг 1. Проводится оценка значений критериев своевременности, полноты, целостности и аутентичности для набора исходных данных (набора ИР).

Шаг 2. Производится несколько тестовых прогонов алгоритма с целью получения наборов выходных данных.

Шаг 3. Проводится оценка ошибок первого и второго рода на наборах выходных данных.

Шаг 4. Определяются средневзвешенные оценки ошибок первого и второго рода.

Шаг 5. Фиксируем для конкретного алгоритма значения полученных оценок, которые будут использоваться при пересчете значений критериев полноты D_C , целостности D_I и аутентичности D_A .

Введем обозначения:

– для пересчета D_C – это P_C^I и P_C^{II} – вероятность отсутствия ошибки первого и второго рода соответственно при оценке значения полноты;

– для пересчета D_I – это P_I^I и P_I^{II} – вероятность отсутствия ошибки первого и второго рода соответственно при оценке значения целостности;

– для пересчета D_A – это P_A^I и P_A^{II} – вероятность отсутствия ошибки первого и второго рода соответственно при оценке значения аутентичности.

Примем следующее допущение (утверждение), что посылка (антецедент) типа ИНАЧЕ может быть преобразована к посылке (антецеденту) типа ЕСЛИ, так как $q_j = False \Rightarrow \overline{q_j} = True$.

В соответствии с таблицей 2 пересчет значений оценок будет выполняться по следующим правилам:

– на примере пересчета оценок полноты:

$$(q_j = True \wedge O_j \neq \emptyset) \Rightarrow$$

$$(O_j(\forall D_C \in \{D_C^{6x}(R_{1j}^{6x})\})) \Rightarrow D_C^{6yx}(\forall R_{2j}^{6yx}) = \min\{D_C^{6x}(R_{1j}^{6x})\} \cdot \min\{P_C^I, P_C^{II}\}$$

– на примере пересчета оценок целостности:

$$(q_j = True \wedge O_j \neq \emptyset) \Rightarrow$$

$$(O_j(\forall D_I \in \{D_I^{6x}(R_{1j}^{6x})\})) \Rightarrow D_I^{6yx}(\forall R_{2j}^{6yx}) = \min\{D_I^{6x}(R_{1j}^{6x})\} \cdot \min\{P_I^I, P_I^{II}\}$$

– на примере пересчета оценок аутентичности:

$$(q_j = True \wedge O_j \neq \emptyset) \Rightarrow$$

$$(O_j(\forall D_A \in \{D_A^{6x}(R_{1j}^{6x})\})) \Rightarrow D_A^{6yx}(\forall R_{2j}^{6yx}) = \min\{D_A^{6x}(R_{1j}^{6x})\} \cdot \min\{P_A^I, P_A^{II}\}$$

VI. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОСТОВЕРНОСТИ

Рассмотрим динамику изменения оценок показателей достоверности на следующем примере. Для повышения эффективности процесса создания технологической как одной из видов научно-производственной документации по уже сформированному комплекту конструкторской документации, с учетом специфики и потребностей методов интеллектуального анализа данных, был получен комплекс решений по этапам, представленным на рис. 2. В соответствии с выработанными методиками в системе создается база инженерных знаний, которая хранит накопленные устойчивые закономерности (правила), связывающие элементы конструкторской и технологической документации, а также учитывающие последовательности операций в них. Для создания такой базы знаний используется база данных, содержащая структурированный набор взаимосвязанных данных конструкторской и технологической документации. А для создания и наполнения такой базы данных необходим инструментарий по обработке накопленных на предприятиях комплектов технической документации в виде файлового архива, которыми пользуются технологи при создании новых комплектов документации с учетом факта разработки документаций в разных системах.

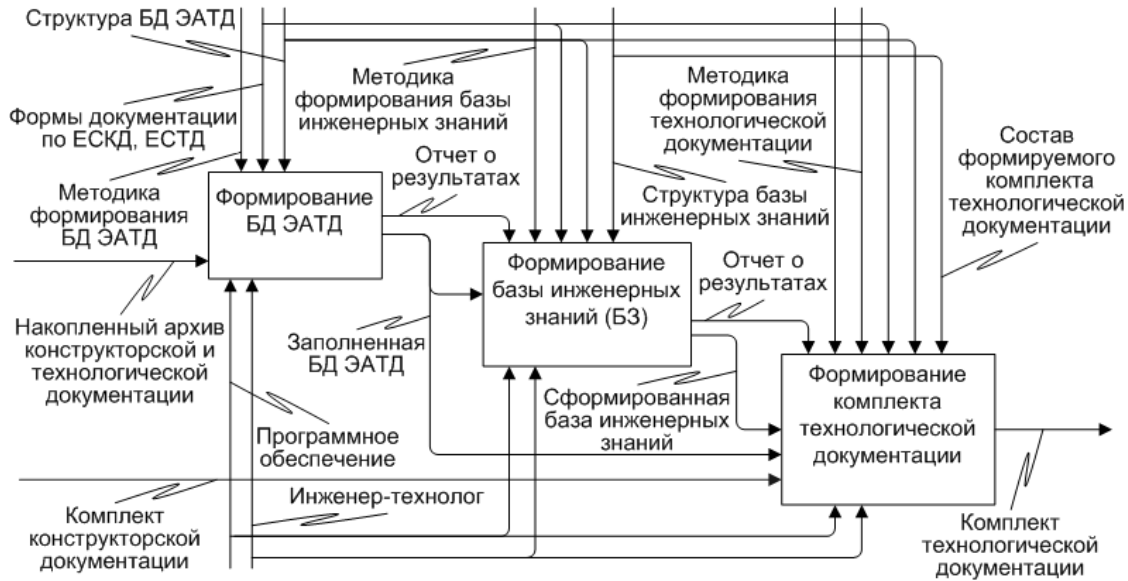


Рис. 2. Схема процесса автоматизации синтеза технологической документации, где БД ЭАТД – база данных электронного архива технической документации

Обычно по умолчанию принимается решение, что формируемая база знаний достоверна и сформирована на достоверных источниках информации. Хотя практика показывает, что дестабилизирующие факторы, снижающие достоверность циркулирующей информации, имеют место и оказывают существенное влияние на процессы.

Чертежи представлены в формате обмена данными. Текстовая конструкторская и технологическая документация представлена в текстовых форматах (doc, xls, pdf и др.).

Ниже приведено пошаговое описание алгоритма формирования БД ЭАТД R_2 на базе архива разработанных проектов R_1 .

При этом модель отображения текстовой конструкторской и технологической документации в БД ЭАТД может быть представлена в виде суперпозиции отображений: $f_2 \circ f_1 : R_1 \rightarrow R_2$, $f_1 : \{(i_n, d, r, c)\} \rightarrow \{(k, j)\}$, $f_2 : \{(k, j)\} \rightarrow \{\tau, \alpha\}$, где n – порядковый номер документа в архиве, i_n – тип n -го документа, d – данные в r -й строке, c -м столбце таблицы n -го документа; $n = \overline{1, n_{R_1}}$, n_{R_1} – количество документов в архиве; $1 \leq i_n \leq 10$; $r = \overline{1, r_n}$, $c = \overline{1, c_n}$, r_n и c_n – количество строк и столбцов в таблице n -го документа; τ – порядковый номер таблицы БД ЭАТД, α – порядковый номер атрибута τ -й таблицы; $\tau = \overline{1, \tau_{R_2}}$, τ_{R_2} – количество таблиц БД ЭАТД; $\alpha = \overline{1, \alpha_\tau}$, α_τ – количество атрибутов в τ -й таблице.

Шаг 1. Для всех $n = \overline{1, n_{R_1}}$ документов F_n архива выполнить шаг 2.

Шаг 2. Если F_n в формате САД, то перейти к шагу 3, иначе к шагу 4.

Шаг 3. Если в F_n чертеж детали, то $P'(F_n)$, иначе если в F_n сборочный чертеж, то $P''(F_n)$, иначе перейти к следующему n .

Шаг 4. Если F_n в текстовом формате, то для всех $i = \overline{1, 10}$: если в F_n – документ i -го типа, то $i_n = i$ и выполнить шаги 5-8.

Шаг 5. Для всех позиций $r = \overline{1, r_n}$, $c = \overline{1, c_n}$ на форме документа F_n выполнить шаги 6–8.

Шаг 6. Считать блок данных d из r -й строки, c -м столбца таблицы документа F_n .

Шаг 7. Определить номер k -ой группы записей и номер j -го атрибута данных d : $(k, j) = f_1(i_n, d, r, c)$.

Шаг 8. Если j -й атрибут k -ой группы записей атомарный, то определить $(\tau, \alpha) = f_2(k, j)$, записать d в α -й атрибут τ -й таблицы и перейти на шаг 1, иначе выполнить шаги 9–15.

Шаг 9. Определить тип l атрибута данных d .

Шаг 10. Если в d найден $t \in T_l$, то перейти к шагу 11, иначе к шагу 15.

Шаг 11. Если для t множество $V \neq \emptyset$ ($V \subseteq V_l$), то к шагу 12, иначе к шагу 15.

Шаг 12. Если в d найден $v \in V$, то шаг 13, иначе к шагу 15.

Шаг 13. Если для v множество $N \neq \emptyset$ ($N \subseteq N_l$), то к шагу 14, иначе к шагу 15.

Шаг 14. Если в d найден $n \in N$, то $d_{ij}^k = (n, t, v)$ записать в БД ЭАТД и перейти на шаг 6, иначе перейти к шагу 15.

Шаг 15. Если в d найден $n \in N_l$, то $d_{ij}^k = (n, null, null)$ записать в БД ЭАТД, иначе передать d для анализа инженеру-технологу; перейти на шаг 6.

Здесь P' , P'' – функции разбора графической и текстовой части чертежей деталей и сборочных единиц и записи результатов разбора в БД ЭАТД.

Как видно из представленного примера выше, все шаги алгоритма можно представить как операторы «ЕСЛИ... ТО...», а также все антецеденты укладываются в одно из типов атомарных правил для посылки (антецедента или условия ЕСЛИ), представленной в табл. 2. Шаги 1, 5, описывающие циклы, также могут быть интерпретированы с точки зрения «ЕСЛИ... ТО...». А именно:

Вариант шага 1: ЕСЛИ ($\exists F_n : (F_n \in R_1) \wedge (R_1 \neq \emptyset) \wedge (1 \leq n \leq n_{R_1})$), ТО выполнить шаг 2, ИНАЧЕ закончить работу.

Вариант шага 5:

ЕСЛИ ($\exists r : (r \in F_n) \wedge (F_n \neq \emptyset) \wedge (1 \leq r \leq r_n) \wedge (\exists c : (c \in F_n) \wedge (F_n \neq \emptyset) \wedge (1 \leq c \leq c_n))$), ТО выполнить шаги 6–8.

Входными данными для приведенной выше методики, реализованной в виде подпрограммы, является неупорядоченная совокупность файлов, в которую входит конструкторская и технологическая документация. В худшем случае реализации асимптотическая сложность алгоритма составит $O(n^4)$. Например, если анализируемый комплект представлен в распечатанном виде и прошел все необходимые проверки с удостоверяющими подписями, то мы можем говорить, что оценки $\{D_A, D_C, D_T, D_I\}$ равны 1. Но предложенный алгоритм и реализованная подпрограмма работают с данными документами в электронном виде, и, следовательно, оценки $\{D_A, D_C, D_T, D_I\}$ могут быть отличны от единицы. Например, у этих документов в электронном виде отсутствует ЭЦП, тогда мы должны снизить показатель D_A , авторами ведутся активные работы по разработке методик оценки показателей $\{D_A, D_C, D_T, D_I\}$ в различных условиях работы и спектра угроз современным ИТКС.

Тогда, если у потока входных документов показатель будет отличен от 1 и пусть равен $D_A = 0.95$, а также в случае присутствия ошибки первого рода алгоритма и $P_A^I = 0.99$, то в базу данных электронного архива преобразованные данные попадут с оценкой $D_A = 0.913$ (рис. 3).

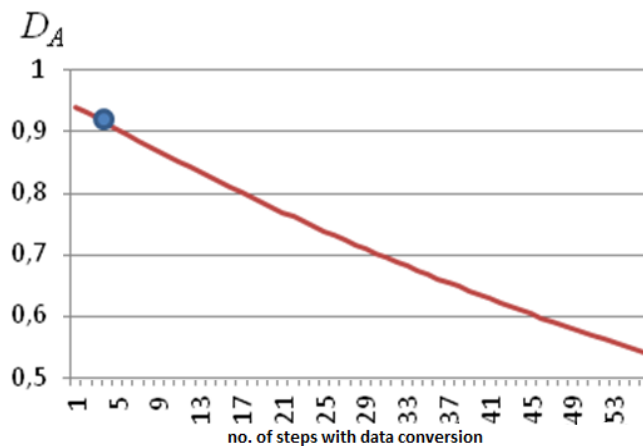


Рис. 3. Пример снижения оценки аутентичности результирующего ИР в зависимости от количества антецедентов, в консеквентах которых этот ИР преобразуется

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С одной стороны, на текущий момент ИТКС настолько вошли в жизнь, что любое принимаемое решение чаще всего основывается на ИР, циркулирующих в ИТКС.

С другой стороны, возможности по случайному, неконтролируемому, умышленному изменению ИР достаточны, чтобы получить решение на недостоверных данных, даже если они проходили первичный контроль перед включением их в базы данных и хранилища ИТКС. Следовательно, в современных хранилищах и базах данных корпоративных систем каждый ресурс должен храниться с оценкой показателей достоверности, кото-

рые, кроме всего прочего, зависят и от времени. И этот факт также нужно учитывать. Развитие работы видится в разработке методик оценки показателей достоверности от множества внешних факторов, в проведении серии экспериментов по выявлению метрик, на основе которых будет выполняться комплексная оценка уровня достоверности ИР в ИТКС, а также разработке проекта автоматизированной системы управления процессами обеспечения достоверности ИР в ИТКС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zakharchenko V. E. Monitoring reliability of parameter values in automated control systems for technological processes // In Proceedings of the Third Russian conference on simulation in science and industry "Simulation: theory and practice": IMMOD-2007. Saint-Petersburg, 2007. Vol. 1. P. 278–286 (In Russian)
2. Folmer E. J. A., Verhoosel J. P. C., Sieminski-Kleyn J. State of the art on semantic IS standardization, interoperability & quality. UT, CTIT, TNO en NOiV, 2011. 167 p.
3. Rieh S.Y. Judgment of information quality and cognitive authority in the WEB // Journal of the American Society for Information Science and Technology/ 2002. Vol. 53(2). P. 145–161.
4. Hoare C. A. R., Data reliability. In Proceedings of the international conference on Reliable software. ACM. New York, NY, USA, 1975. P. 528-533. DOI=10.1145/800027.808476
5. Lee Y.W., Pipino L.L., Funk J.D., Wang R.Y., Journey to data quality. Cambridge, MA. MIT Press, 2006.
6. Huh Y.U., Keller F.R., Redman T.C. and Watkins A.R., Data quality // Information and Software Technology. 1990.No. 32(8). P. 559–565. DOI=10.1016/0950-5849(90)90146-I
7. Katerattanakul P., Siau K. Measuring information quality of web sites: development of an instrument // In Proceedings of the 20th international conference on Information Systems (ICIS '99), Association for Information Systems. Atlanta, GA, USA, 1999. P. 279–285.
8. Yang W. Lee, Diane M. Strong, Beverly K. Kahn, Richard Y. Wang. AIMQ: a methodology for information quality assessment. Inf. Manage. 40, 2. 2002. P. 133–146. DOI=10.1016/S0378-7206(02)00043-5
9. Batini C., Cabrita F., Cappiello C., Francalanci C. A comprehensive data quality methodology for web and structured data. Int. // J. Innov. Comput. Appl. 1. P. 205–218. DOI=10.1504/IJICA.2008.019688
10. Madnick S. E., Wang R. Y., Lee Y. W., Zhu H., Overview and framework for data and information quality research. // J. Data and Information Quality 1, 1, Article 2. 2009. 22 p. DOI=10.1145/1515693.1516680
11. Nuray-Turan R., Kalashnikov D. V., Mehrotra S., Adaptive connection strength models for relationship-based entity resolution. ACM// Journal of Data and Information Quality (ACM JDIQ). 2013. No. 4(2).
12. Davidson I., Grover A., Satyanarayana A., Tayi G. K. A general approach to incorporate data quality matrices into data mining algorithms.// In Proceedings of the tenth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD '04). ACM. New York, NY, USA P. 794–798. DOI=10.1145/1014052.1016916
13. Olson J. E., Data quality: the accuracy dimension (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems). Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
14. Maimon O., Kandel A. Last M. Information-theoretic fuzzy approach to data reliability and data mining // Fuzzy Sets and Systems. 2001. Vol. 117, no 2. P. 183–194.
15. Hipp J., Güntzer U., Grimmer U., Data quality mining-making a virtue of necessity DMKD, 2001. 6 p.
16. Ballou D. P., Pazer H. L., Modeling data and process quality in multi-input, multi-output information systems // Management Science. 1985. No. 31(2). P. 150–162.
17. Polyanskii D. A., Monakhov M. Yu., Model for estimating the factors modifying reliability in enterprise data networks // Proceedings of the higher educational institutions. Instrument engineering. 2012. Vol. 55, no 8. P. 39–43.
18. Polyanskii D. A., Monakhov M. Yu., Significance evaluation technique for error conditions in data processing within enterprise automatic control system // Automation and Remote Control. 2011. Vol. 72, no 5. P. 1114–1117.
19. Umar A., Karabatis G., Ness L. [et. al.] Enterprise data quality: a pragmatic approach. // Information Systems Frontiers 1999. 1, 3 (October).P. 279–301. DOI=10.1023/A:1010006529488
20. Nelson R. Ryan, Peter A. Todd, Antecedents of information and system quality: an empirical examination within the context of data warehousing // J. Manage. Inf. Syst. 21. 2005. No 4. P. 199–235.
21. Monakhov M. Yu., Monakhov Yu.M., Semenova I. I., Model for controlling the process of ensuring the reliability of information resources in information and telecommunication systems. Design and technology of electronic instruments. 2014, no 3. P.34-40.
22. Monakhov M.Yu., Semenova I.I., Cognitive model for information reliability level estimation in the synthesized technological documentation // Modern problems of science and education. 2014. No. 1. URL: <http://www.science-education.ru/115-12147>.

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 519.24:004.023:004.041

НАПОЛНЕНИЕ УЗЛОВ SIEM-СИСТЕМЫ МЕТОДИКОЙ РАСЧЕТА ОБЪЕКТИВНЫХ ОЦЕНОК ДЛЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК В МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА РИСКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А. Ж. Абденов, В. А. Трушин

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация – В работе рассматриваются вопросы совершенствования методики управления рисками соответствующих узлов SIEM-системы на основе расчетов объективных оценок для повышения достоверности субъективных оценок и повышения эффективности защиты информационных ресурсов в информационных системах. Подобная методика предназначена для целей организации в режиме реального времени, рекомендаций для защиты информации в информационных системах предприятия. Расчеты рисков основаны на объективных оценках вероятностей реализации неблагоприятных событий, предсказаний величин ущербов от нарушений информационной безопасности.

Ключевые слова: оценка риска, защита информации, информационная система, объективные оценки, ущербы.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка систем комплексной, активной, с элементами интеллектуальных сервисов защиты конфиденциальной информации (КИ) требует успешной реализации различных мероприятий по защите информационных ресурсов (ИР) в компьютерных системах (КС). Эти мероприятия предполагают решение целого ряда задач, в частности, создание системы мониторинга угроз безопасности. Системы мониторинга реализуют текущий и апостериорный подходы к защите информации и основной целью своего создания имеют снижение количества инцидентов, воздействующих на ИР КС до минимального уровня риска, и минимизацию возникающего при этом ущерба. В данной работе инцидентом будем считать любое незаконное, неразрешенное, неблагоприятное событие (НС), которое совершается в информационной системе (ИС).

Одним из наиболее перспективных и эффективных направлений в создании систем мониторинга угроз безопасности в настоящее время считаются SIEM-системы (Security Information and Event Management), обеспечивающие управление информацией и событиями безопасности. Основной целью построения и функционирования SIEM-системы является значительное повышение уровня информационной безопасности (ИБ) в информационной инфраструктуре за счет обеспечения возможности в режиме реального времени манипулировать информацией о безопасности, осуществлять активное управление событиями безопасности [1]. Предполагается, что активное управление инцидентами и событиями безопасности основывается на автоматических механизмах, использующих накопленную информацию о предыстории анализируемых событий и прогнозе будущих событий, а также на автоматической подстройке параметров мониторинга событий к текущему состоянию защищаемой системы и выдаче рекомендаций для корректировки политики ИБ на основе эффективного использования средств защиты ИР в КС [2, 3].

Обсуждение вопросов, возникающих в разрабатываемых SIEM-системах для сервисных информационных инфраструктур, проводится в проекте MASSIF (MAnagement of Security Information and Event in Service Infrastructure – Управление информацией и событиями безопасности в инфраструктурах услуг) седьмой рамочной программы Европейского союза [1]. Мы предполагаем, что одним из обсуждаемых вопросов в рамках проекта MASSIF должны быть вопросы наполнения и постоянного совершенствования отдельных узлов SIEM-системы возможностями решения задач классификации инцидентов, прогнозирования, фильтрации и оптимизации использования средств защиты ИР в КС [3–6]. Для достижения поставленных целей SIEM-система должна обладать возможностью успешного решения следующего комплекса задач:

- сбора, обработки и анализа событий безопасности, поступающих в систему из множества гетерогенных источников;
- обнаружения в режиме реального времени атак, нарушений критериев и политик безопасности;

- анализа и управления рисками в ИС на основе объективных и экспертных оценок [5];
- оперативной оценки защищенности информационных, телекоммуникационных и других критически важных ИР;
- проведения расследований инцидентов;
- обнаружения расхождения результатов анализа критически важных ИР и бизнес-процессов с внутренними политиками ИБ и последующее приведение их в соответствие друг с другом;
- принятия эффективных решений по защите информации [6];
- формирования отчетных документов.

Основными исходными данными, которые используются SIEM-системой для решения указанных задач, являются записи различных журналов аудита (logs), протоколирующие события в информационной инфраструктуре, называемые «событиями безопасности». Данные события отражают такие действия пользователей и программ, которые могут оказать влияние на ИБ. Из общего множества событий безопасности SIEM-система должна в режиме реального времени находить такие события безопасности, которые свидетельствуют об атаках или иных воздействиях, причем традиционные методы поиска такой информации достаточно трудоемки.

Для обнаружения, анализа и разрешения возникающих проблем по защите ИР, разработанные в европейских государствах SIEM-системы имеют архитектуру «агенты–хранилище данных–сервер приложений» [1–3, 7]. Агенты выполняют сбор событий безопасности, их первоначальную обработку, нормализацию, классификацию и фильтрацию. Собранные, классифицированные, отфильтрованные информации о событиях безопасности поступают в репозиторий, (хранилище данных в SIEM-системах), где они хранятся во внутреннем формате представления с целью последующего использования и анализа сервером приложений. Серверы приложений анализируют информации, хранимые в репозитории и преобразуют их для выработки предупреждений, других рекомендаций в режиме реального времени, а также управленческих решений по защите информации.

В перспективных SIEM-системах (то есть в системах нового поколения) к числу расширений функциональных наполнений узлов SIEM-системы следует добавить анализ событий, инцидентов и их последствий, принятие решений и визуализацию информации. Раскроем примерное содержание некоторых механизмов функциональных наполнений узлов по уровням иерархии SIEM-системы:

- нормализация означает приведение форматов записей журналов, собранных из различных источников к единому внутреннему формату, который затем будет использоваться для их хранения и последующей обработки [2,3, 7];
- фильтрация событий безопасности заключается в корректировке текущих оценок состояния защищенности ИР в КС и расчеты этих оценок на будущий интервал времени [8, 9];
- приоритезация определяет значимость и критичность событий безопасности на основании правил, определенных в системе [1, 7];
- корреляция делается для того, чтобы заметить появление соответствующих шаблонов событий, шаблонов отношений между переменными событиями, с тем чтобы оценить уровень безопасности контролируемой области и генерировать подробные отчеты безопасности [4, 9, 10];
- анализ событий, инцидентов и их последствий включают процедуры моделирования событий, атак и их последствий, анализа уязвимостей, оценок риска, прогнозирования и фильтрации оценок ИС и инцидентов [11–14];
- система поддержки принятия решений (СППР) определяет выработку мер по оптимизации и реконфигурированию средств защиты с целью предотвращения атак на КС [2, 3];
- генерация отчетов и предупреждений означает формирование, передачу, отображение и (или) печать результатов функционирования [2, 3, 4].

В данной работе будут предложены и раскрыты некоторые элементы наполнения отдельных узлов SIEM-системы алгоритмами решения задач расчета риска на основе объективных оценок, а также расчета оценок предсказания и фильтрации количества ИС, величину ущерба ИР в КС [5, 6, 8, 9, 13].

1. Постановка задачи. Расчет объективных оценок для повышения достоверности предлагаемых экспертных оценок для оценивания риска в ИС

Основанный на рисках подход к оценке потенциального ущерба от атак нарушителей и выбору мер для его минимизации получил название «Управление рисками». Под «управлением рисками» подразумевается полный комплекс алгоритмов и мероприятий из ряда выполняемых последовательно процессов, что соответствует существующим международным стандартам и практике управления рисками на предприятиях [13, 14]: идентификация рисков, анализ рисков, принятие рисков, мониторинг и пересмотр. В существующих методиках управления рисками их идентификация осуществляется различными методами, такими как командные «мозговые штурмы», анализ архитектуры системы защиты ИР, операционное моделирование, анализ сценариев, исследо-

вания HAZOP (HAZard and OPerability studies). HAZOP – это признанный лидер при анализе рисков на особо опасных объектах с катастрофическими последствиями [12]. На современном этапе одна из эффективных методик управления рисками основана на экспертных оценках [13].

Основанием расчета и анализа рисков являются статистические данные из репозитория SIEM-системы, собранные в процессе идентификации рисков, а результаты работы системного аналитика используются лицами или процессами из соответствующих узлов SIEM-систем, принимающими решения в СППР [13]. В настоящее время модели анализа и оценки рисков проходят стадию развития [14], которые рассматривают управление рисками как принятие решений в условиях неопределенности, а количественные показатели риска – как критерии принятия альтернативных или взаимодополняющих решений в процессе какой-либо деятельности.

Оценки риска рассчитываются в зависимости от вероятности реализации НС в ИС. Различают объективные и субъективные вероятности наступления НС. Оценка объективных вероятностей наступления НС – одна из важных задач в алгоритме расчета оценок риска. При этом использование этих объективных оценок для повышения эффективности и достоверности расчетов экспертных оценок риска в ИС предприятия является важной задачей в методике расчета оценок потенциального ущерба от атак разрушителей.

1.1. Алгоритм расчета объективной вероятности реализаций НС в ИС

Для эффективного анализа НС воздействующих на ИР в ИС, необходимо предварительно решить некоторые задачи классификации и корреляции [4, 10]. В частности, для построения математической модели в форме моделей пространства состояний (ПС) [8, 9] с целью оценивания состояния защищенности ИР в ИС, в первую очередь, необходимо определить уровень «зрелости» предприятия с точки зрения обеспечения ИБ. Для этого можно воспользоваться классификацией, предложенной специалистами компании Gartner (исследовательская и консалтинговая компания, специализирующаяся на рынках информационных технологий. Официальный сайт: www.gartner.com), которая подразумевает четыре уровня «зрелости» [15].

Нулевой уровень ($i = 0$): ИБ в компании никто не занимается, руководство компании не осознает важности проблем ИБ; финансирование отсутствует; ИБ на примитивном уровне реализуется штатными средствами операционных систем, систем управления базами данных и приложений.

Первый уровень ($i = 1$): ИБ рассматривается руководством как чисто «техническая» проблема, отсутствует единая программа (концепция ИБ, политика) развития систем обеспечения информационной безопасности (СОИБ) предприятия или организации; финансирование ведется в рамках общего бюджета на информационные технологии; ИБ реализуется средствами нулевого уровня плюс средства резервного копирования, антивирусные средства, межсетевые экраны, средства организации VPN (Virtual Private Network – построения виртуальных частных сетей), т. е. традиционные средства защиты.

Второй уровень ($i = 2$; $u = 2$): ИБ рассматривается руководством как комплекс организационных и технических мероприятий, существует понимание важности ИБ для производственных процессов, есть утвержденная руководством программа развития СОИБ компании; финансирование ведется в рамках отдельного бюджета; ИБ реализуется средствами первого уровня плюс средства усиленной аутентификации, средства анализа почтовых сообщений и web-контента, IDS (Intrusion Detection System – системы обнаружения вторжений), средства анализа защищенности, SSO (Single Sign On – средства однократной аутентификации), PKI (Public Key Infrastructure – инфраструктура открытых ключей) и организационные меры (внутренний и внешний аудит, анализ риска, политика ИБ, положения, процедуры, регламенты и руководства).

Третий уровень ($i = 3$; $u = 1$): ИБ является частью корпоративной культуры, назначен CISA (Certified Information Systems Auditor – старший администратор по вопросам обеспечения ИБ); финансирование ведется в рамках отдельного бюджета; ИБ реализуется средствами второго уровня плюс системы управления ИБ, CSIRT (Computer Security Incident Response Team – группа реагирования на инциденты нарушения ИБ), SLA (Service Level Agreement – соглашение об уровне сервиса).

Таким образом, специалисты по ИБ или экспертная группа на конкретном предприятии могут зафиксировать значение входного управляющего сигнала, отнеся свою компанию к тому или иному уровню «зрелости» в соответствии с представленной классификацией. Значение входного управляющего сигнала $u(t)$ может быть задано также компетентными специалистами, которые учтут род деятельности предприятия, количество сотрудников и прочие данные, влияющие на систему ИБ.

Каждый зафиксированный инцидент должен пройти процедуру классификации с целью определения вида НС и помещения зафиксированного инцидента в определенный класс для последующих процедур обработки.

Далее необходимо осуществить процедуру классификации в зависимости от количества компьютерных рабочих мест (КРМ). Такая классификация необходима при оптимизации выбора средств защиты ИР в ИС. При этом классификация очень сильно влияет на оценку определения уровня «зрелости» предприятия или организа-

ции. Количественные интервалы относительно КРМ должны определяться специалистами по ИБ, которые знакомы со статистической информацией хранящиеся в репозиториях SIEM-систем.

После всех процедур относительно решения задач классификации и корреляции можно переходить к расчету объективных оценок с целью повышения объективной информативности для принятия решений при расчете субъективных оценок в окончательной процедуре оценивания риска. В работе [5] была предложена одна версия методики расчета объективной вероятности реализаций НС в КС. В данной работе эта методика дополнена вариантом условия учета взаимной корреляции шумов динамики поведения исследуемого объекта и шумов измерительной системы при расчете оценок предсказания и фильтрации количества НС и соответствующих оценок ущерба.

Из списка множества существующих видов НС, имеющихся в репозитории SIEM-системы, выделяются существенное подмножество видов НС, приводящих к ощутимому нарушению безопасности ИР в КС. Это подмножество обозначим через $O = \{O_{i_1}, O_{i_2}, \dots, O_{i_m}\}$, например, O_{i_1} – вид НС относительно нарушения запуска отдельных узлов КС; O_{i_2} – вид НС относительно неверного набора информации применительно к конкретному информационному процессу и обработке данных и т.д.

После построения подмножества O переходим к анализу свойств элементов подмножества на основе количественных показателей НС и соответствующей величины ущерба, имевшей место в прошлом. Математическое ожидание ущерба, вызываемого i -м НС за время ΔT (например, 1 месяц), можно представить формулой:

$$e(O_i, \Delta T) = M[e(O_i) \cdot f_i], i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где $e(O_i)$ – случайная величина ущерба уже случившегося НС при единичном наступлении НС;

f_i – случайная величина количества НС i -го вида за время ΔT ; m – общее количество всех видов уже случившихся НС i -ого вида.

Если НС не имеют последствия в том смысле, что ущерб от каждого НС независим, то

$$e(O_i, \Delta T) = M[e(O_i)] \cdot M[f_i], i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

а ущерб для всего множества существенных НС будет определяться с помощью соотношения

$$E(O, \Delta T) = \sum_{i=1}^m M[e(O_i)] \cdot M[f_i]. \quad (3)$$

Алгоритм 1

Шаг 1.1. Для простоты будем рассматривать лишь один вид НС, например, зафиксируем конкретное значение $i = 1$. Далее, количественные показатели НС, например, за μ лет сведем в табл. 1:

ТАБЛИЦА 1
КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НС ($f_i^{(j)}$), ПРОИЗОШЕДШИХ
В ТЕЧЕНИЕ ПОСЛЕДНИХ μ ЛЕТ ПО МЕСЯЦАМ

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$f_1^{(1)}$	$f_2^{(1)}$	$f_3^{(1)}$	$f_4^{(1)}$	$f_5^{(1)}$	$f_6^{(1)}$	$f_7^{(1)}$	$f_8^{(1)}$	$f_9^{(1)}$	$f_{10}^{(1)}$	$f_{11}^{(1)}$	$f_{12}^{(1)}$
⋮
μ	$f_1^{(\mu)}$	$f_2^{(\mu)}$	$f_3^{(\mu)}$	$f_4^{(\mu)}$	$f_5^{(\mu)}$	$f_6^{(\mu)}$	$f_7^{(\mu)}$	$f_8^{(\mu)}$	$f_9^{(\mu)}$	$f_{10}^{(\mu)}$	$f_{11}^{(\mu)}$	$f_{12}^{(\mu)}$

где $f_i^{(j)}$, $j = \overline{1, \mu}$, μ – количество лет, $t = \overline{1, 12}$, t – номер месяца в году.

Шаг 1.2. Исходя из данных табл. 1, с помощью формулы (4) можно получить одну строку данных усредненных помесечных количественных значений НС по столбцам:

$$f_i^{yep} = \sum_{i=1}^{\mu} f_i^{(i)} / \mu, t = \overline{1, 12}. \quad (4)$$

Аналогичные таблицы желательно построить относительно других существенных видов НС.

Шаг 1.3. Для дальнейших расчетов необходимо подготовить данные, которые являются данными округленными до целого относительно данных таблицы, полученные по формуле (4) (см. табл. 2).

ТАБЛИЦА 2

УСРЕДНЕННАЯ СТРОКА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗОШЕДШИХ НС, ОКРУГЛЕННЫХ ДО ЦЕЛОГО ОТНОСИТЕЛЬНО ДАННЫХ ТАБЛИЦЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО ФОРМУЛЕ (4)

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
f_{yt}^{ycp}	f_{y1}	f_{y2}	f_{y3}	f_{y4}	f_{y5}	f_{y6}	f_{y7}	f_{y8}	f_{y9}	f_{y10}	f_{y11}	f_{y12}

Шаг 1.4. Применительно к усредненным данным (см. табл. 2) можно построить математическую модель в форме пространства состояний (ПС) по методике, изложенной в [5]:

$$x(t+1) = a \cdot x(t) + b + w(t), \quad x(1) = \bar{x}_1, \quad (5)$$

$$f^{ycp}(t+1) = x(t+1) + v(t+1), \quad t = \overline{1, N-1}, \quad (6)$$

где $x(t)$ – истинное количество фиксированного вида НС, произошедших в течение месяца t ; $w(t)$ – белое гауссовское ненаблюдаемое воздействие на зафиксированный вид НС в момент времени t с нулевым математическим ожиданием и неизвестной дисперсией Q ; $x(1)$ – гауссовская величина, отражающая количество НС в начальный момент времени $t=1$ с математическим ожиданием \bar{x}_1 и неизвестной дисперсией $P(1)$; a, b – неизвестные коэффициенты в модели динамики (5); t – номер месяца в году; $N = 12$ – число месяцев в году; $f_t^{ycp} = f^{ycp}(t)$ – наблюдаемое случайное количество НС в течение месяца t (данные из репозитория SIEM-системы или из журнала наблюдений предприятия); $v(t)$ – белая гауссовская последовательность ошибок наблюдений относительно количества НС в течение каждого месяца с нулевым математическим ожиданием и неизвестной дисперсией R .

На данном шаге требуется оценить все дисперсии, связанные с шумами модели динамики \hat{Q} и шумом величины начального состояния $\hat{P}(1)$, шумами измерительной системы \hat{R} на основе выхода данных наблюдений и рекуррентных формул, которые приведены в работе [5].

Шаг 1.5. Оценки коэффициентов \hat{a}, \hat{b} в модели динамики (5) можно рассчитать с помощью метода наименьших квадратов (МНК) на основе (возможно отфильтрованных от шумов) данных наблюдений $\{x(t) \approx f^{ycp}(t), t = \overline{1, N}\}$.

Шаг 1.6. Построенная модель (5), (6) позволит получить наиболее достоверные оценки количества НС с учетом условий взаимной независимости шумов динамики поведения и измерителя [5] или случай взаимной их коррелированности [9] (возможны и другие случаи, например случай коррелированности данных выхода измерительной системы), относительно каждого месяца в виде оценок фильтрации за последующий, например, $(\mu + 1)$ год (в режиме реального времени с помощью уравнений фильтра Калмана). Полученные оценки фильтрации должны быть округлены до ближайшего целого.

Шаг 1.7. Оценки фильтрации за 12 месяцев $(\mu + 1)$ года (рассчитанные на основе данных реальных наблюдений и оценок предсказаний) позволят рассчитать объективные вероятностные оценки реализаций НС. Например, предлагается следующая процедура расчета вероятности для конкретного вида НС.

Пусть нас интересует вероятность появления НС в каждом месяце предыдущего

μ -го года. Для этого подсчитывается общее суммарное количество (для усредненного количества) НС оценок фильтрации в течение всего μ -года ($F^{(\mu)}$), а затем фильтрационная оценка количества НС в течение каждого месяца ($f^{(\mu)}(t)$) делится на общую суммарную оценку фильтрационных оценок количества НС ($F^{(\mu)}$) в течение одного μ -года, которая определяется по формуле:

$$p^{(\mu)}(t) = f^{(\mu)}(t) / F^{(\mu)}, \quad t = \overline{1, 12}, \quad (7)$$

где $p_t^{(\mu)} = p^{(\mu)}(t)$ – объективная вероятность реализации конкретного вида НС в течение каждого месяца μ -года и всех 12 месяцев. При этом для μ -го года будем иметь:

$$\sum_{t=1}^{12} p^{(\mu)}(t) = 1, \quad \mu = 4, 5, \dots$$

ТАБЛИЦА 3

ОБЪЕКТИВНЫЕ ВЕРОЯТНОСТИ ($p_i^{(\mu)}$) РЕАЛИЗАЦИЙ КОНКРЕТНОГО ВИДА НС В ТЕЧЕНИЕ μ -ГО ГОДА

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_t^{(\mu)}$	$P_1^{(\mu)}$	$P_2^{(\mu)}$	$P_3^{(\mu)}$	$P_4^{(\mu)}$	$P_5^{(\mu)}$	$P_6^{(\mu)}$	$P_7^{(\mu)}$	$P_8^{(\mu)}$	$P_9^{(\mu)}$	$P_{10}^{(\mu)}$	$P_{11}^{(\mu)}$	$P_{12}^{(\mu)}$

где $p_i^{(\mu)}$, $t = \overline{1, 12}$, μ –й год.

Алгоритм 1, например, апробирован на тестовом примере при условии взаимной независимости шумов динамики поведения и измерителя [5]. В данной работе алгоритм 1 реализован для случая взаимно-коррелированных шумов объекта и измерителя [9] относительно модели в форме ПС вида (5), (6).

Результаты расчетов алгоритма 1 фиксируются в виде отдельной строки таблицы объективных оценок реализаций НС в КС для каждого вида из подмножества существенных видов НС $O = \{O_i, i = \overline{1, m}\}$, приводящих к ощутимому нарушению безопасности ИР в КС.

1.2. Объективная стоимостная оценка предсказания величины ущерба от нарушений безопасности ИР

Алгоритм 2

Шаг 2.1. Пусть $O = \{O_i, i = \overline{1, m}\}$ – множество существенных видов НС, приводящих к нарушению безопасности ИР. В п.1.1. данной работы была предложена и кратко описана процедура расчета оценки помесечной объективной вероятности количества нарушений определенного вида атаки на ИР в ИС предприятия. Предположим далее, что в отделе информационной безопасности (ИБ) предприятия или в репозитории SIEM-системы имеется статистика относительно ежемесячной оценки ущерба, которая соответствует ежемесячному количеству нарушений ИБ конкретного i -го вида атаки, т.е. значениям данных таблицы 1 соответствуют значения данных таблицы 4. Пусть, например, $i = 1$.

ТАБЛИЦА 4

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЕЖЕМЕСЯЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ УЩЕРБА ($S_i^{(j)}$) ОТ НАРУШЕНИЙ ИБ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ i -ГО ВИДА АТАКИ

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$S_1^{(1)}$	$S_2^{(1)}$	$S_3^{(1)}$	$S_4^{(1)}$	$S_5^{(1)}$	$S_6^{(1)}$	$S_7^{(1)}$	$S_8^{(1)}$	$S_9^{(1)}$	$S_{10}^{(1)}$	$S_{11}^{(1)}$	$S_{12}^{(1)}$
\vdots
μ	$S_1^{(\mu)}$	$S_2^{(\mu)}$	$S_3^{(\mu)}$	$S_4^{(\mu)}$	$S_5^{(\mu)}$	$S_6^{(\mu)}$	$S_7^{(\mu)}$	$S_8^{(\mu)}$	$S_9^{(\mu)}$	$S_{10}^{(\mu)}$	$S_{11}^{(\mu)}$	$S_{12}^{(\mu)}$

где $S_i^{(j)}$, $j = \overline{1, \mu}$, μ – количество лет, $t = \overline{1, 12}$, t – номер месяца в году.

Шаг 2.2. Заметим, что не всегда ежемесячные показатели ущерба прямо пропорциональны количеству произошедших НС. Тем не менее на основе данных табл. 4 можно построить линейную модель в форме ПС, которая будет соответствовать усредненным данным наблюдений, рассчитанным по столбцам относительно данных табл. 4. Элементы строки усредненных данных вычисляются с помощью соотношения (8) и могут быть сохранены в таблице.

$$s_i^{(y)} = (\sum_{t=1}^{\mu} S_i^{(t)}) / \mu, \quad t = \overline{1, 12}. \tag{8}$$

Шаг 2.3. На основе строки усредненных данных $\{s_i^{(y)}, t = \overline{1, 12}\}$ по алгоритму, описанному в работах [3], можно построить линейную модель в форме ПС вида

$$s(t+1) = \hat{c} \cdot s(t) + \hat{d} + w(t), \quad s(0) = s_0, \quad t = \overline{0, 11}, \tag{9}$$

$$s^y(t+1) = s(t+1) + v(t+1), \quad t = \overline{0, 11}. \tag{10}$$

При этом сначала на основе строки усредненных данных, соответствующих таблице ущербов, рассчитываются оценки неизвестных дисперсий шумов модели вида (9), (10), а именно оценки дисперсий \hat{Q} , \hat{R} , $\hat{P}(1)$ на основе рекуррентных формул, которые предложены и описаны в работе [5].

Шаг 2.4. Далее рассчитываем коэффициенты \hat{c} , \hat{d} модели динамики (9) с помощью МНК на основе данных из таблицы строки усредненных данных.

Шаг 2.5. Предположим, что мы располагаем данными наблюдений количественных показателей ущерба (например, из репозитория SIEM-системы), нанесенных ИР предприятия в $(\mu + 1)$ году (см. табл. 5).

ТАБЛИЦА 5

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ УЩЕРБА ОТ НАРУШЕНИЙ ИБ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ i -ГО ВИДА АТАКИ В $(\mu + 1)$ ГОДУ

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$S_t^{(\mu)}$	$S_1^{(\mu)}$	$S_2^{(\mu)}$	$S_3^{(\mu)}$	$S_4^{(\mu)}$	$S_5^{(\mu)}$	$S_6^{(\mu)}$	$S_7^{(\mu)}$	$S_8^{(\mu)}$	$S_9^{(\mu)}$	$S_{10}^{(\mu)}$	$S_{11}^{(\mu)}$	$S_{12}^{(\mu)}$

где $S_t^{(\mu)}$, $t = \overline{1, 12}$, $\mu = \mu + 1$ –ый год.

Используя уравнения фильтра Калмана и данные табл. 5, получим последовательность оценок фильтрации $\{\hat{s}(t | t), t = \overline{1, 12}\}$ относительно ежемесячных более достоверных количественных показателей нанесенного ущерба, представленных в виде строки таблицы ежемесячных количественных показателей оценок фильтрации нанесенного ущерба в $(\mu + 1)$ году.

Шаг 2.6. Используя округленные до ближайших целых чисел данные оценок фильтрации относительно количественных показателей, свершившихся НС в течение $(\mu + 1)$ года по месяцам и данные табл. 5 относительно оценок фильтрации как количественных показателей ущерба, нанесенных на ИР предприятия в $(\mu + 1)$ году, можно получить усредненный ущерб нанесенных от единичного случая свершившегося НС $\{e(t), t = \overline{1, 12}\}$. Для этого необходимо данные строки табл. 5 разделить на соответствующие данные из табл. 2, округленные до целого, элементы строки данных количества реализации НС. Расчетные данные можно свести в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6

УСРЕДНЕННЫЙ НАНЕСЕННЫЙ УЩЕРБ ОТ ЕДИНИЧНОГО СЛУЧАЯ СВЕРШИВШЕГОСЯ НС

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$e(t)$	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}	e_{11}	e_{12}

Шаг 2.7. Предсказывая количество НС (f_i^{pre}) i -го вида с помощью соответствующей модели в форме ПС (5), (6) и соответствующего усредненного ущерба от единичного случая свершившегося НС (т.е. по данным табл. 6), можно получить оценку предсказания величины ущерба, которая будет нанесена предприятию в t -й месяц $(\mu + 2)$ (текущего) года.

Алгоритм 2, например, апробирован на тестовом примере при условии взаимной независимости шумов динамики поведения и измерителя [5]. В данной работе алгоритм 2 реализован для случая взаимно-коррелированных шумов объекта и измерителя [9] относительно модели в форме ПС вида (9, 10).

Результаты расчетов алгоритма 2 фиксируются в виде отдельной строки таблицы объективных оценок предсказания величины ущерба в зависимости от соответствующих оценок реализаций НС в КС для каждого вида НС из подмножества существенных видов НС $O = \{O_i, i = \overline{1, m}\}$, приводящих к осязательному нарушению безопасности ИР в КС.

Наконец, вся экспертная группа перед выставлением своих экспертных оценок, по различным семействам контролей безопасности [13], должна быть ознакомлена с результатами таблицы объективных оценок реализаций НС в КС и соответствующей таблицы объективных оценок предсказания величины ущерба для каждого вида НС из подмножества существенных видов НС $O = \{O_i, i = \overline{1, m}\}$, приводящих к осязательному нарушению безопасности ИР в КС.

2. Группы контролей безопасности

Меры безопасности (альтернативное название – «контроли безопасности»), возможно применяемые для ИБ в ИС предприятий, которые можно поделить на три основные группы: технические, операционные и управленческие [13]. Группы, в свою очередь, разбиваются на семейства. Перечислены эти контроли безопасности в стандарте [16].

В группу управленческих контролей входят меры безопасности для ИС, которые используются при управлении рисками для ИБ ИС. Группа содержит пять семейств контролей [13, 16]. В группу операционных контролей входят меры безопасности для ИС, которые прежде всего, реализуются и выполняются людьми. В группу входят 9 семейств контролей. В группу технических контролей входят меры безопасности для ИС, которые, прежде всего, реализуются и выполняются через действия в аппаратных средствах, программном обеспечении системы. В группу входят четыре семейства контролей [13, 16].

Эксперты могут быть включены в группу с различной профессиональной подготовкой, например: технической, финансовой, инженерной и управленческой, со своими собственными индивидуальными восприятиями, отношениями и побуждениями в определении ущерба от количества реализованных НС. Поэтому перед началом расчета величины риска в ИС предприятия на основе экспертных оценок необходимо всем экспертам ознакомиться с результатами: таблицы объективных оценок реализаций НС в КС и соответствующей таблицы объективных оценок предсказания величины ущерба для каждого вида НС из подмножества существенных видов НС $O = \{O_i, i = \overline{1, m}\}$, приводящих к осязаемому нарушению безопасности ИР в КС. После знакомства с результатами этих двух таблиц объективных оценок, по всем видам существенных НС, каждый эксперт из группы выставляет свои экспертные оценки и на основе этих оценок проводят расчет оценок риска по всем ИС предприятия.

Например, пусть на предприятии, для которого мы оцениваем риски, существует три ИС: ИС-1, ИС-2, ИС-3. Экспертами после ознакомления с результатами объективных оценок были обнаружены определенные уязвимости и угрозы, относящиеся к различным семействам контролей. Далее были проведены расчеты оценок риска на основе экспертных оценок по методике, описанной в работе [13]. Методика расчетов риска для всех трех ИС была апробирована на тестовых данных. Результаты численных расчетов приведены в работе [5].

После ранжирования ИС по уровню риска в порядке убывания были получены следующие расчетные данные (см. табл. 10).

ТАБЛИЦА 10
РАНГИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Информационная система	ИС-2	ИС-3	ИС-1
Уровень риска	0,453	0,446	0,410

Из табл. 10 видно, что ИС-2 получает самый высокий уровень риска. Значит, вероятность реализации угроз и ущерб для этой системы больше, чем для остальных систем. Поэтому руководителям организации, в первую очередь, необходимо обратить внимание на безопасность ИС-2. Более подробную и детальную рекомендации можно получить от соответствующих узлов SIEM-систем.

3. Алгоритм фильтра Калмана. Случай взаимно-коррелированных шумов динамики и измерителя.

Выше было отмечено примерное содержание основных механизмов по уровням иерархии SIEM-системы: нормализация означает приведение форматов записей журналов, собранных из различных источников к внутреннему формату, которые затем будут использоваться в последующей обработке; корреляция разнородных событий; анализ событий, инцидентов и их последствий, включающая процедуры моделирования событий, анализ уязвимостей и защищенности системы; оценка риска, например, для случая, когда при решении задачи оценивания состояния на основе модели в форме ПС необходимо учесть корреляцию шумов поведения динамики исследуемого объекта и шумов данных наблюдений. В алгоритмах 1 и 2 при построении моделей в форме ПС, в работе [5], предполагались, что шумы динамики и шумы измерительной системы белые и гауссовские. Эти шумы между собой и начальным состоянием предполагались взаимно-некоррелированными. При этих условиях для расчетов оценок предсказаний и фильтраций использовались стандартные уравнения фильтра Калмана.

Но на практике могут встречаться случаи, когда шумы динамики и шумы измерительной системы могут быть взаимно-коррелированными. Поэтому в данной работе рассматривается алгоритм фильтра Калмана как вариант расширения соответствующего узла SIEM-системы, дополнительным алгоритмом для случая, когда шумы динамики и измерителей коррелированы между собой [9].

Пусть объект исследования описывается стационарными непрерывно-дискретными моделями в форме ПС вида:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B + C \cdot w(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (11)$$

$$y(t_k + 1) = H \cdot x(t_k) + v(t_k), \quad t_{k-1} \leq t \leq t_k, \quad k = \overline{1, N}, \quad (12)$$

где x – n – вектор состояния; \dot{x} – n – вектор производной состояния по времени $t \geq t_0$; w – q – вектор шумов динамики; y – m – вектор наблюдений; v – m – вектор шумов измерителей.

Предполагается, что система представляет собой стационарный процесс. Поэтому матрицы A, B, C являются постоянными и они имеют размеры $n \times n$, $n \times r$, $n \times q$. Непрерывное время обозначается символом t , производная по времени – точкой сверху, а дискретное время через t_k . Нижний индекс отмечает порядковый номер момента времени наблюдения. Случайный процесс $\{w(t), t \geq t_0\}$ представляет собой белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и матричной корреляционной функцией вида:

$$E[w(t)w^T(\tau)] = Q \cdot \delta(t - \tau),$$

для всех $t, \tau \geq t_0$, где $\delta(t - \tau)$ – дельта функция Дирака. Матрица Q размера $q \times q$ непрерывна и неотрицательно по определена для $t \geq t_0$.

Последовательность $\{v(t_k), t_k \in [t_0, t_N], k = 0, 1, 2, \dots, N\}$ представляет собой белую гауссовскую последовательность с нулевым математическим ожиданием и матричной корреляционной функцией вида:

$$E[v(t_k) \cdot v^T(\tau_j)] = R \cdot \delta_{kj},$$

где δ_{kj} – символ Кронекера, значения которого определяются из соотношения $\delta_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{при } k = j, \\ 0 & \text{при } k \neq j, \end{cases}$ для всех $t_k, \tau_j \geq t_0$. Матрица R размера $m \times m$ положительна, определена для $t_k \geq t_0$. Предполагается также, что два указанных в (11), (12) случайных процесса в дискретном представлении $w(t_k)$ и $v(t_j)$, коррелированы между собой:

$$E \left[\begin{pmatrix} w(t_k) \\ v(t_k) \end{pmatrix} \cdot \left(w^T(t_k) : v^T(t_k) \right) \right] = \begin{pmatrix} \tilde{Q} & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \quad \text{для всех } t_k \geq t_0, \text{ при } \tilde{Q} \geq 0, S \geq 0, R > 0. \text{ Здесь } S \text{ – взаимно-}$$

корреляционная матрица шумов динамики объекта и измерителя размера $q \times m$; \tilde{Q} – ковариационная матрица для дискретной модели, соответствующая непрерывной модели.

При этом для оценок состояния линейной непрерывно-дискретной системы будем использовать результаты работы [9], в которой алгоритм оценивания состояния для линейных дискретных систем обобщаются на случай взаимно-коррелированных шумов объекта и измерителя.

При предположениях, указанных выше, оценки состояния будут вычисляться по следующим формулам (для непрерывной обновлённой последовательности):

$$\hat{x}(t | t_k) = A \cdot \hat{x}(t | t_k) + B + F_0(t) \cdot \tilde{y}(t_k); \quad \hat{x}(t_0 | t_0) = x(t_0); \quad (13)$$

$$\dot{P}(t | t_k) = A_0 \cdot P(t | t_k) + P(t | t_k) \cdot A_0^T + Q_0; \quad P(t_0 | t_0) = P(t_0); \quad (14)$$

$$K(t_{k+1}) = P(t_{k+1} | t_k) \cdot H^T \cdot [H \cdot P(t_{k+1} | t_k) \cdot H^T + R]^{-1}; \quad (15)$$

$$\hat{x}(t_{k+1} | t_{k+1}) = \hat{x}(t_{k+1} | t_k) + K(t_{k+1}) \cdot [y(t_{k+1}) - H \cdot \hat{x}(t_{k+1} | t_k)]; \quad (16)$$

$$P(t_{k+1} | t_{k+1}) = [I - K(t_{k+1}) \cdot H] \cdot P(t_{k+1} | t_k); \quad (17)$$

где $A_0 = A - F_0 \cdot H$; $F_0 = C \cdot S \cdot R^{-1}$; $Q_0 = C \cdot Q \cdot C^T - F_0 \cdot R \cdot F_0^T$, при $t_k \geq t_0, k = 0, 1, 2, \dots, N, t_1 \leq t \leq t_N$.

Как видим, структура алгоритмов фильтрации при взаимно-коррелированных шумах объекта и измерителя почти аналогичны алгоритму фильтрации при взаимно-некоррелированных шумах.

Существенным отличием является запись дифференциального уравнения (13) для оценок предсказания. Это уравнение содержит дополнительное слагаемое, учитывающее информацию о коррелированности шумов, и которое требует на первом этапе знания наблюдения для начального состояния объекта. Этот вопрос в работе [9] остаётся открытым. Нужно заметить, что эта проблема возникает лишь в том случае, когда шумы коррелированы. Здесь, видимо, можно предложить два способа оценки наблюдения для состояния в момент запуска объекта. Первый способ состоит в том, что мы для достаточно малых временных интервалов проводим серию наблюдений и, предполагая, что шумы некоррелированы и используя алгоритм фильтрации при некоррелированных шумах, определяем серию оценок предсказания наблюдений. Затем производим по этим известным оценкам наблюдений предсказания на один шаг назад. На практике можно столкнуться со случаями, когда связь между шумами объекта и измерителя тесная. Тогда вышеизложенный способ может привести к плохой оценке наблюдения для начального состояния объекта. В этом случае, видимо, проще использовать уравнения наблюдения для оценки в момент запуска системы.

Информация о взаимной корреляции шумов динамики и измерительной системы содержится также в уравнении (14), тогда как уравнение расчета корреляционной матрицы ошибки оценок предсказания в стандартных уравнениях фильтра Калмана такого слагаемого не содержит.

Заметим, что на практике могут возникать различные случаи описания поведения объекта, например, случай, когда данные выхода измерительной системы коррелированы между собой; описание поведения исследуемого объекта в виде нелинейных соотношений в моделях в форме ПС [8]; описание поведения объекта в виде нестационарных моделей в форме ПС [17, 18] и т. д. Все эти случаи должны быть реализованы различной совокупностью уравнений в алгоритмах 1 и 2 при выполнении расчетов относительно оценок предсказания и фильтрации в соответствующих узлах SIEM системы.

Заключение

Выше были представлены: систематизированное изложение математических методов и моделей в форме ПС для последующего анализа контролей безопасностей, которые были нацелены на изучение объективных подходов для защиты ИР в КС; сформулированы и показаны практического характера шаги расчета объективных оценок зависящих от использования различных типов структур моделей в форме ПС и различных взаимоотношений и свойств составляющих компонентов, используемых при описании количественных характеристик показателей поведения исследуемых объектов, которые учитывались экспертами для предложения своих экспертных оценок для расчета рисков относительно исследуемых информационных систем.

Управление рисками основаны, прежде всего, на объективных статистических данных, которые: фиксируются, накапливаются, анализируются, хранятся, обрабатываются для целей оценивания потенциального ущерба от ошибок пользователей и атак нарушителей на ИР в ИС предприятия на основе данных, хранящихся в репозитории SIEM-систем, а также выбора средств защиты ИР для минимизации ущерба, расчета оценок предсказания и фильтрации всех возможных параметров и показателей, связанных с ИБ. В частности, были предложены методики, позволяющие рассчитывать оценки объективной вероятности в возможности наступления различных видов ИС, оценки объективной стоимости ущерба от нарушений безопасности ИР в ИС предприятия и оценки предсказания и фильтрации величины ущерба. Все основные расчеты показателей ИБ в ИС предприятия нацелены на использовании возможностей стохастических моделей в форме ПС и уравнений фильтра Калмана для получения более достоверных значений оценок фильтрации состояния исследуемого объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котенко И. В., Саенко И. Б. SIEM-системы для управление информацией и событиями безопасности // Защита информации. INSIDE. 2012. № 5. С. 54–65.
2. Miller D. R., Harris Sh., Harper A. A. Van-Dyke S., Black Ch. Security Information and Event Management (SIEM) Implementation. McGrawHill Companies. 2011. 430 p.
3. Muhammad Afzaal, Cesario Di Sarno, Salvatore D'Antonio, Luigi Romano. An Intrusion and Fault Tolerant Forensic Storage for SIEM System // Eighth International Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems. 2012. P. 579–586.
4. Cross Mark, Saso Karakatic, Vili Podgoreles. Improved classification with allocation method and multiple classifiers // Information Fusion. 2016. 31. P. 26–42
5. Абденов А. Ж., Заркумова-Райхель Р. Н. Оценивание риска в информационных системах на основе объективных и экспертных оценок // Вопросы защиты информации. 2015. № 1. С. 64–70.
6. Абденов А. Ж., Заркумова Р. Н. Выбор средства эффективной защиты с помощью методов теории игр // Вопросы защиты информации. 2010. № 2. С. 26–31.

7. Novikova E., Kotenko I. Analytical Visualization Techniques for Security Information and Event Management // 21st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing. 2013. P. 519–525.
8. Синицын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева: учеб. пособие. М.: Университетская книга: Логос, 2006. 640 с.
9. Симкин М. М. О рекуррентной фильтрации при взаимно-коррелированных шумах объекта и измерителя // Автоматика и телемеханика. 1980. № 1. С. 71–80.
10. Luigi Coppolino, Salvatore D'Antonio, Valerio Formicola, Luigi Romano. A framework for mastering heterogeneity in multi-layer security information and event correlation // Journal of Systems Architecture. 2015. P. 1–15.
11. ISO/IEC 27005:2008. Information technology. Security techniques. Information security risk management. 2008. 56 p.
12. Risk management: Implementation principles and inventories for risk management/risk assessment methods and tools. ENISA (European Network and Information Security Agency), 2006. 168 p.
13. Chi-Chun Lo, Wan-Jia Chen. A hybrid information security risk assessment procedure considering interdependencies between controls // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 39. P. 248–257.
14. Vose D. Risk Analysis: F Quantitative guide. 3-rd edition. John Wiley & Sons, 2008. 752 p.
15. Kumamoto H., Henley E. Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. 2-nd edition. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Inc. New York, 1996. 620 p.
16. Информационная безопасность. Уровни зрелости СОИБ организации. URL: <http://www.wikisec.ru>.
17. NIST SP 800-30:2012. Guide for conducting Risk Assessments [электронный ресурс] // National Institute of Standards and Technology. URL: <http://csrc.nist.gov/publications/PubsSPs.html>. (дата обращения: 29.05.2013).
18. Гайшун И. В. Идентификация линейных нестационарных систем по реакции на обобщенные управления // Дифференц. уравнения. 2008. 44. С. 301–307.
19. Богословский С. В., Богословский В. С. Динамика нестационарных систем с равномерно изменяющимися во времени коэффициентами // Науч. приборостр. 2002. 12, № 3. С. 83–92.

УДК 528.854

АЛГОРИТМ СПЕКТРАЛЬНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

А. Е. Баринов¹, А. А. Захаров¹, А. Л. Жизняков¹

*Муромский институт Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, г. Муром, Россия*

Аннотация – Рассматривается разработка алгоритма кластеризации особенностей для выделения лица человека на изображениях. Для выделения кластеров используется подход, основанный на спектральной теории графов. Характеристики графов формируются с помощью случайного обхода графа. Для получения информации о возможной кластерной структуре используется собственный вектор, соответствующий минимальному собственному значению матрицы времени обхода. Априорная информация о пропорциях головы используется для наложения ограничений на результаты кластеризации. В работе описан алгоритм, проведены исследования, показаны результаты экспериментов.

Ключевые слова: кластеризация с ограничениями, спектральная теория графов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Выделение лица человека на изображениях является важной задачей во многих областях: человеко-машинные интерфейсы, биометрические системы, системы виртуальной реальности и т.д. В настоящее время большое внимание уделяется подходам, основанным на использовании компьютерного зрения. Несмотря на множество исследований в этой области, до сих пор актуальными являются задачи повышения скорости и точности обработки, снижения чувствительности к шумовым эффектам.

Для выделения лица человека предлагается использовать кластеризацию особенностей изображений. Для этого применяется структурный подход, основанный на графах. Структурные подходы описывают объекты на основе частей и отношений между ними. Преимуществом структурных методов является то, что они позволяют анализировать большое множество элементов на основе малого количества простых составляющих и правил формирования графической модели [1]. Также структурные методы позволяют описать те характеристики объ-

екта, которые исключают его отнесение к другому классу, что повышает надежность распознавания [1–3]. Для выделения областей изображений предлагается использовать кластеризацию на основе спектральной теории графов.

Графы описываются с использованием матриц, на основе которых вычисляются собственные значения. Упорядоченный набор собственных значений представляет собой спектр графа. При спектральной кластеризации используются следующие подходы: преобразование матрицы подобия путем перестановки собственных векторов [4]; анализ кластерной структуры, содержащейся в собственных векторах [5, 6]. Данные подходы основаны на спектре матрицы Лапласа [4–7].

Для управления процессом кластеризации оценивается также распределение информации между ребрами графа. Для этого используется процесс случайного обхода графа (Random Walk) [8]. Для описания этого процесса используется дискретная функция Грина [9]. Она рассчитывается по спектру графа и позволяет вычислить важные свойства случайного обхода: время прохождения случайного пути (Hitting Time) и время обхода графа (Commute Time). Время обхода устойчиво к изменениям структуры и содержит в себе информацию о кластерной структуре графа [6].

Для более точного задания кластеров вводятся ограничения. Методы кластеризации с ограничениями могут быть разбиты на две группы. Методы первой группы используют исходное пространство данных [10–13]. Эти подходы обладают высокой сложностью составления ограничений. Вторая группа методов работает с результатами кластеризации [14–16]. В данном случае составление условий для кластеризации сильно упрощается.

Предлагаемым подходом является использование ограничений для задания формы кластера особенностей при выделении лица человека на изображениях.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для выделения лица на снимках сложных сцен с помощью графов используются особенности изображений. Кластеризация особенностей вместе с наложением условий даст возможность получить группы детекторов, относящихся только к области головы человека на изображении.

Предлагается использовать метод на основе случайного обхода графа. Для этого используется матрица времени обхода графа, которая содержит информацию обо всех случайных путях между всеми вершинами графа. Время обхода применяется во многих областях: алгоритмы поиска по графу [17], алгоритмы фильтрации [18], анализ целостности данных [19], анализ связей в нейронных сетях [20] и т.д. При использовании времени обхода учитываются все связи между всеми вершинами графа. Это делает время обхода графа устойчивым к перестановке, удалению и добавлению вершин. На основе времени обхода можно оценивать кластерную структуру графа. Для анализа кластерной структуры графа используется следующее важное свойство: значение времени обхода между вершинами одного кластера значительно меньше времени обхода между вершинами различных кластеров [21].

Для получения точных результатов при кластеризации особенностей необходимо использовать ограничивающие условия. Пропорции головы используются в качестве априорной информации, применяемой при наложении ограничений на результаты кластеризации [22].

III. ТЕОРИЯ

3. Случайный обход графа

Случайный обход графа основан на вероятностных процессах, проходящих в марковских цепях [23].

Время прохождения случайного пути (Hitting Time) $H(A, B)$ между вершинами A и B представляет количество вершин, которые случайно будут пройдены, если путь начнется из вершины A и закончится в вершине B . В процессе обхода уже посещенные вершины могут быть пройдены вновь. Это зависит от вероятности перехода.

Время обхода графа $CT(A, B)$ (Commute Time) между вершинами A и B равно количеству вершин, которые случайно будут пройдены, если путь начнется из вершины A , пройдет через вершину B и закончится в вершине A .

4. Кластеризация по времени обхода

В алгоритме кластеризации предлагается использовать матрицу времени обхода. Она вычисляется по спектру нормализованной матрицы Лапласа. Информация о кластерной структуре графа содержится в собственном векторе матрицы.

На вход алгоритма поступают особые точки сцены, выделенные с помощью метода KLT (Kanade–Lucas–Tomasi) [24]. Предлагается на основе выделенных особенностей построить взвешенный граф. Для описания

графа $\Gamma = (V, E)$, где каждая вершина соответствует точке из набора данных, а каждая пара вершин соединена ребром, необходимо построить матрицу смежности. Матрица смежности, рассчитанная с использованием метрики Гаусса, примет следующий вид:

$$W_{ij} = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma}\right), \quad (1)$$

где x_i, x_j – точки из набора данных, между которыми устанавливается подобие;

σ – параметр, с помощью которого регулируется чувствительность функции подобия.

По взвешенной матрице смежности W вычисляется матрица степеней графа [4]. Также на этом этапе вычисляется сумма степеней вершин:

$$vol = \sum_{v \in V} d_v, \quad (2)$$

где d_v – степень вершины графа.

Для расчета случайного обхода графа и получения матрицы времени обхода необходимо использовать нормализованную матрицу Лапласа. Для взвешенного графа нормализованная матрица Лапласа имеет вид:

$$L_n = \begin{cases} 1, & u = v; \\ -\frac{w(u, v)}{\sqrt{d_u d_v}}, & u \neq v; \\ 0, & \text{в другом случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где $w(u, v)$ – вес ребра, которое соединяет вершины u и v ;

d_u, d_v – степени вершин u и v соответственно.

Для вычисления собственных значений и собственных векторов нормализованной матрицы Лапласа необходимо провести декомпозицию:

$$L_n = \Phi \Lambda \Phi^T, \quad (4)$$

где Λ – диагональная матрица собственных значений $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|V|}$;

Φ – матрица собственных векторов.

Функция Грина связана с матрицей Лапласа, характеризует связь вершин графа и используется для расчета матрицы времени обхода. На основе нормализованной матрицы Лапласа и ее спектра можно получить матрицу Грина:

$$G_n(u, v) = \sum_{i=2}^{|V|} \frac{1}{\lambda_i} \phi_i(u) \phi_i(v), \quad (5)$$

где λ_i – собственные значения нормализованной матрицы Лапласа L_n

ϕ_i – собственные векторы нормализованной матрицы Лапласа L_n .

Допустим, $H(u, v)$ – время прохождения случайного пути между вершинами u и v . Тогда время обхода будет иметь вид $CT(u, v) = H(u, v) + H(v, u)$.

Матрица времени обхода может быть рассчитана с использованием матрицы Грина (4) и примет следующий вид [5]:

$$CT(u, v) = vol \sum_{i=2}^{|V|} \frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{\phi_i(u)}{\sqrt{d_u}} - \frac{\phi_i(v)}{\sqrt{d_v}} \right)^2. \quad (6)$$

Элементами этой матрицы являются значения времени обхода между каждой парой вершин. Далее происходит спектральная декомпозиция матрицы времени обхода. Элементы собственного вектора $CT\phi_0$, соответ-

ствующего минимальному собственному значению этой матрицы, содержат информацию о кластерной структуре графа. Каждое значение этого вектора характеризует соответствующую точку исходного пространства данных. Отнесение точек к различным кластерам происходит согласно следующему условию:

$$\text{Points}(v) \in \begin{cases} \text{Cluster1,} & CT\phi_0(v) \geq 0; \\ \text{Cluster2,} & \text{в другом случае.} \end{cases} \quad (7)$$

5. Кластеризация с ограничениями

Для управления процессом кластеризации вводятся ограничивающие условия. Для этого используется априорная информация о пропорциях головы человека. Предлагается использовать сетку пропорций головы. Данное понятие заимствовано из искусства для изображения головы человека. Было установлено, что независимо от пола и расы, пропорции лиц различных людей одинаковы [22].

Для построения сетки пропорций выделяются особенности снимков. На изображение лица накладывается сетка, содержащая 5 ячеек по горизонтали и 7 – по вертикали. Чтобы применять сетку пропорций в ходе кластеризации, необходимо рассчитать для нее усредненный шаблон. Для этого были выбраны 500 изображений лиц, рассчитаны особые точки, вручную наложена сетка пропорций (рис. 1а).

В результате получено усредненное расположение особых точек относительно ячеек сетки пропорций (рис. 1б).

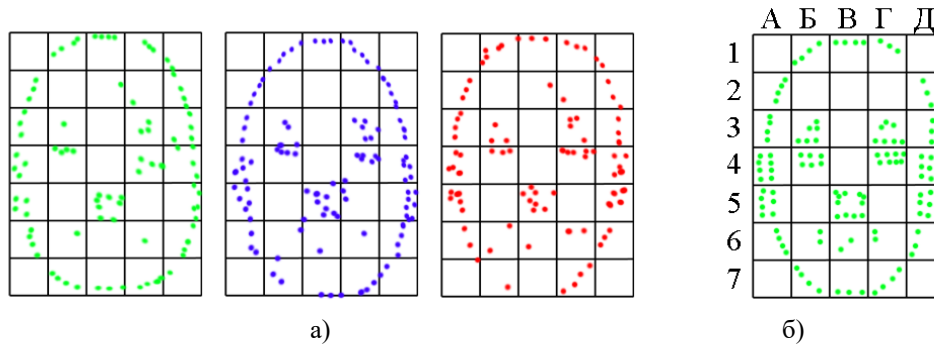


Рис. 1. Сетка пропорций для выделения точек, принадлежащих голове человека: а) примеры выделения особенностей на различных лицах; б) усредненный шаблон сетки пропорций

Таким образом, для отнесения рассматриваемого кластера к области головы должны выполняться следующие условия. Так как форма головы человека может быть описана овалом, то используются следующие пропорциональные отношения для задания кластера:

$$\text{Cluster}(n) = \begin{cases} true, & \frac{W_{cluster}}{L_{cluster}} - \frac{W_{net}}{L_{net}} \leq \delta; \\ false, & \text{в другом случае,} \end{cases} \quad (8)$$

где $W_{cluster}, L_{cluster}$ – ширина и длина кластера, W_{net}, L_{net} – ширина и длина сетки пропорций, δ – допустимый порог.

Точки кластера не могут принадлежать к угловым ячейкам сетки пропорций:

$$\text{Cluster}(n) = \begin{cases} true, & \text{ClusterPoints}(n) \notin \{\text{Net}_{A,1}, \text{Net}_{D,1}, \text{Net}_{A,7}, \text{Net}_{D,7}\}; \\ false, & \text{в другом случае.} \end{cases} \quad (9)$$

В ячейках, характеризующих ключевые части головы, особенности должны присутствовать обязательно. Обычно такими частями являются глаза, рот, уши:

$$\text{Cluster}(n) = \begin{cases} true, & \text{ClusterPoints}(n) \in \left\{ \text{Net}_{A,4}, \text{Net}_{A,5}, \text{Net}_{B,3}, \text{Net}_{B,4}, \text{Net}_{\Gamma,3}, \right. \\ & \left. \text{Net}_{\Gamma,4}, \text{Net}_{D,4}, \text{Net}_{D,5}, \text{Net}_{B,5} \right\}; \\ false, & \text{в другом случае.} \end{cases} \quad (10)$$

Точки должны описывать овальную форму головы по контуру:

$$\text{Cluster}(n) = \begin{cases} true, & \text{ClusterPoints}(n) \in \left\{ \begin{array}{l} \text{Net}_{A,2}, \text{Net}_{A,3}, \text{Net}_{A,6}, \text{Net}_{B,7}, \text{Net}_{B,7}, \\ \text{Net}_{\Gamma,7}, \text{Net}_{D,6}, \text{Net}_{D,3}, \text{Net}_{D,2}, \text{Net}_{B,1}, \\ \text{Net}_{\Gamma,1}, \text{Net}_{D,1} \end{array} \right\}; \\ false, & \text{в другом случае.} \end{cases} \quad (11)$$

Таким образом, с учетом условий, разработанный алгоритм состоит из следующих шагов:

Шаг 1. По имеющемуся набору особенностей строится взвешенный граф $\Gamma = (V, E)$, с матрицей смежности W (1).

Шаг 2. Вычисляется матрица степеней D и сумма степеней графа vol (2).

Шаг 3. Строится нормализованная матрица Лапласа (3), вычисляется ее спектр (4).

Шаг 4. Рассчитывается матрица Грина (5) и строится матрица времени обхода (6).

Шаг 5. Находится минимальное собственное значение матрицы времени обхода и соответствующий ему собственный вектор. Происходит разбиение исходного набора точек на кластеры (7).

Шаг 6. Происходит наложение сетки пропорций. Проверяются условия (8–11). Если ни один кластер не удовлетворяет значениям сетки, происходит рекурсивное деление большего кластера до достижения минимально допустимого размера.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ходе экспериментов полученный алгоритм был исследован на время и точность работы. Данные параметры являются приоритетными в прикладных задачах, связанных с изображениями лица человека.

Для проведения экспериментов использовались тестовые изображения (рис. 3). По результатам кластеризации, проведенной без наложения условий, было выделено 5 различных объектов. С введением ограничений по пропорциональным отношениям были получены три объекта, удовлетворяющие условиям. При кластеризации с полным набором ограничений (7–10) был выделен только один объект.

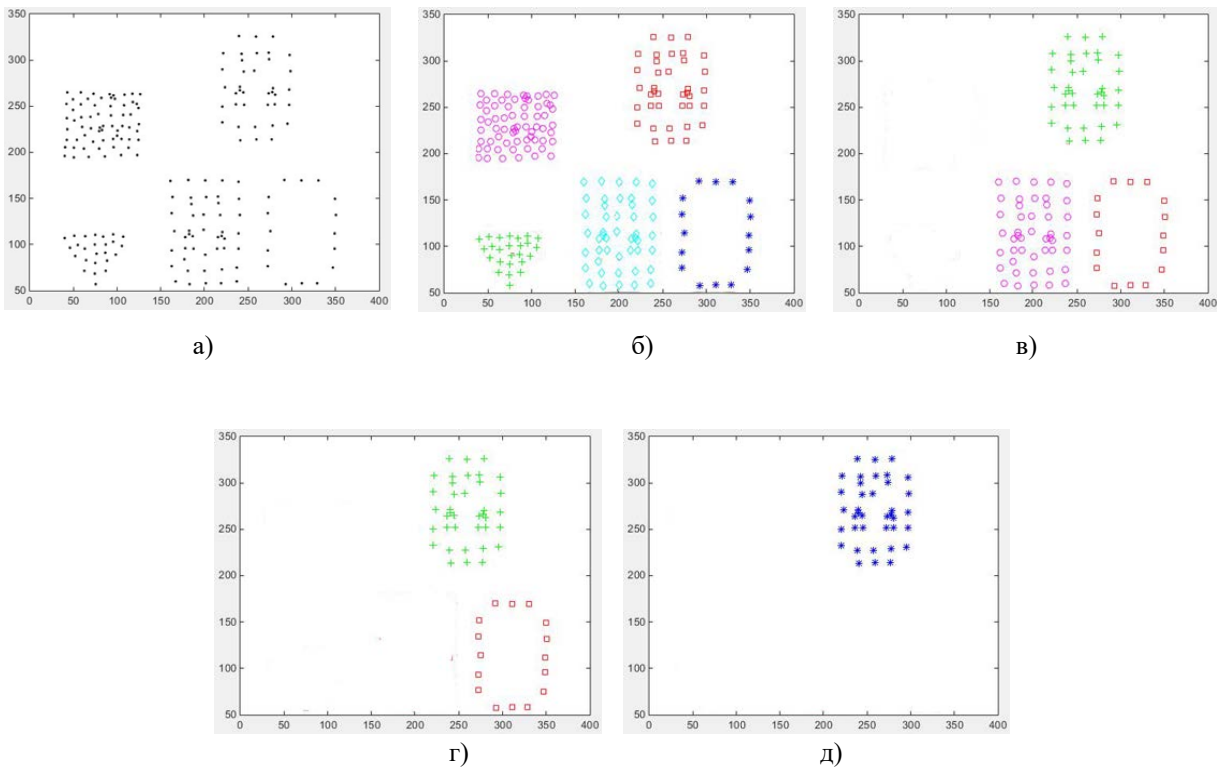


Рис. 3. Результаты кластеризации с тестовым набором точек:

а) исходный набор точек; б) кластеризация без наложения условий, выделено 5 объектов; в) кластеризация с условием (8), выделено 3 объекта; г) кластеризация с условиями (9, 11), выделено 2 объекта; д) кластеризация с использованием всех условий (8–11), выделен 1 объект.

Также проведено сравнение результатов работы предложенного алгоритма и алгоритма нормализованных разрезов на графах [6]. Эксперименты проводились на изображениях, содержащих лицо человека (рис. 4). Результаты работы алгоритма нормализованных разрезов сильно зависят от значения σ , выбранного на начальном этапе для построения взвешенной матрицы смежности. В то же время, при выборе определенного значения σ , можно получить результат, когда голова человека попадет в отдельный кластер. Однако при отсутствии ограничений на следующих этапах, точки, принадлежащие области головы, все равно будут отнесены к разным кластерам.

Разработанный алгоритм, напротив, менее чувствителен к изменению параметра σ . Он способен выделять кластеры, различные по размеру, что позволяет более точно локализовать заданную область. Однако без использования ограничивающих условий правильное выделение области лица также невозможно. Таким образом, использование кластеризации на основе случайного обхода графа совместно с ограничивающими условиями позволяет повысить точность выделения. На рисунке 4 показан пример кластеризации изображения, содержащего лицо человека.

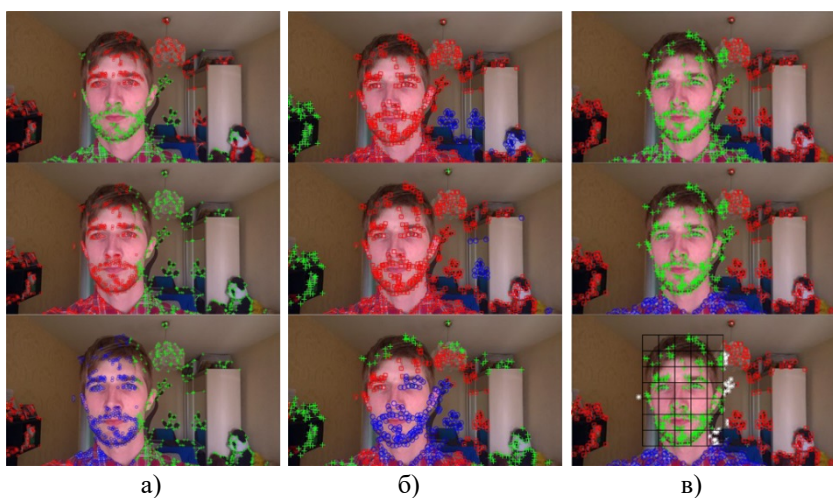


Рис. 4. Результаты кластеризации (по строкам сверху вниз: $\sigma = 1$; $\sigma = 100$; $\sigma = 200$):

а) алгоритм нормализованных разрезов на графах, б) алгоритм кластеризации на основе случайного обхода графа без наложения сетки пропорций, в) алгоритм кластеризации на основе случайного обхода графа с использованием сетки пропорций

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанный алгоритм кластеризации с ограничениями состоит из двух этапов: кластеризация особенностей, наложение ограничений на результаты кластеризации. Наиболее известным алгоритмом спектральной кластеризации является метод нормализованного разреза [6]. Он работает быстрее и обладает вычислительной сложностью $O(n^{3/2})$. Сложность разработанного алгоритма $O(n^2)$. Это объясняется необходимостью два раза рассчитывать собственные значения: на основе матрицы Лапласа и матрицы времени обхода. Однако дополнительные расчеты позволили добиться большей точности. Разработанный алгоритм выделяет кластеры в зависимости от обнаруженной кластерной структуры. Если, например, массив детекторов представляет собой несколько обособленных групп, то на каждой итерации будет происходить выделение одной группы. Это происходит из-за того, что при расчете времени обхода учитываются все связи между всеми вершинами графа. В то же время применение априорной информации позволяет точно выделять группы особенностей изображения, которые принадлежат именно голове человека.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описано применение метода случайного обхода графа для выделения головы человека на изображениях. Для уточнения результатов кластеризации применены ограничения. Условия ограничений заданы на основе априорной информации о пропорциях головы человека. В качестве дополнительных условий используются также данные о возможном расположении особых точек на изображении головы.

Показаны результаты работы предложенного алгоритма на тестовых и реальных изображениях. Проведенные эксперименты позволяют говорить о том, что случайный обход графа с использованием ограничений на основе априорной информации может успешно применяться в задаче выделения головы человека на изображе-

ниях. Предложенный подход может быть также использован для выделения на изображениях других объектов сцены в соответствии с заранее заданными условиями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-37-00235, 15-07-01612), задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России (проект № 2918)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fu K. S. Syntactic methods in pattern recognition. New York: Academic Press, 1974. 617 p.
2. Zakharov A. A., Barinov A. E., Zhiznyakov A. L. Recognition of human pose from images based on graph spectra // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. Vol. XL-5/W6. P. 9–12.
3. Zakharov A., Tuzhilkin A., Zhiznyakov A. Automatic building detection from satellite images using spectral graph theory // Mechanical engineering, automation and control systems: International Conference on. IEEE conference publications, 2015.
4. Scott G., Longuet-Higgins H. Feature grouping by relocalisation of eigenvectors of the proximity matrix // British Machine Vision Conference, 1990. P. 103–108.
5. Sarkar S., Boyer K. L. Quantitative measures of change based on feature organization: eigenvalues and eigenvectors // Computer vision and pattern recognition. 1996. P. 478–483.
6. Shi J., Malik J. Normalized cuts and image segmentation // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2000. № 8 (22). P. 888–905.
7. Weiss Y. Segmentation using eigenvectors: a unifying view // International conference on computer vision, 1999. P. 975–982.
8. Qiu H., Hancock E. R. Image segmentation using commute times // British machine vision conference, 2005. P. 929–938.
9. Chung F. R. K., Yau S. T. Discrete green's functions // Journal of combinatorial theory. Series A. 2000. N. 91. P. 191–214.
10. Kamvar S. D., Klein D., Manning C. D. Spectral learning // Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2003. P. 561–566.
11. Xu Q., desJardins M., Wagstaff K. Constrained spectral clustering under a local proximity structure assumption // Proceedings of the 18th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, 2005. P. 866–867.
12. Ji X., Xu W. Document clustering with prior knowledge // Proceedings of the 29th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, 2006. P. 405–412.
13. Wang F., Ding C., Li T. Integrated KL (K-means - Laplacian) clustering: A new clustering approach by combining attribute data and pairwise relations // Proceedings of the 9th SIAM International Conference on Data Mining, 2009. P. 38–48.
14. Coleman T., Saunderson J., Wirth A. Spectral clustering with inconsistent advice // Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning, 2008. P. 152–159.
15. Yu S. X., Shi J. Grouping with bias // Advances in Neural Information Processing Systems, 2001. P. 1327–1334.
16. Li Z., Liu J., Tang X. Constrained clustering via spectral regularization // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. P. 421–424.
17. Sarcar P., Moore A. W., Prakash A. Fast incremental proximity search in large graphs // Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning, 2008. P. 896–903.
18. Brand M. A random walks perspective on maximizing satisfaction and profit // SIAM International Conference on Data Mining, 2005. P. 12–19.
19. Khoa N. L. D., Chawla S. Robust outlier detection using commute time and eigenspace embedding // AKDD '10: Proceedings of the The 14th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2010. P. 422–434.
20. Liben-Nowell D., Kleinberg J. The link prediction problem for social networks // Proceedings of the twelfth international conference on Information and knowledge management, CIKM '03, 2003. P. 556–559.
21. Luxburg U., Radl A., Hein M. Hitting and commute times in large random neighborhood graphs // Journal of Machine Learning Research. 2014. № 15. P. 1751–1798.
22. Куприянов В. В., Стовичек Г. В. Лицо человека. М.: Медицина, 1988. 272 с.
23. Melia M., Shi J. A random walks view of spectral segmentation // NIPS. 2000. P. 873–879.
24. Shi J., Tomasi C. Good features to track // CVPR. 1994. P. 593–600.

УДК 004.5

ИНТЕРФЕЙС СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ УРОВНЯ РАЗВИТИЯ
ДЕТЕЙ ДОШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА
С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ

О. В. Батенькина

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Рассматриваются этапы и методы проектирования опыта взаимодействия детей дошкольного возраста (от 3 до 7 лет) с ограниченными возможностями здоровья с компьютерной системой диагностики уровня развития с учетом особенностей восприятия информации. Проведенное исследование характеристик отклонений и нарушений в развитии детей дошкольного возраста позволило выделить особенности восприятия ими информации, на основе которых были разработаны руководящие принципы для создания пользовательского интерфейса компьютерной системы диагностики. Данные принципы позволили разработать интерфейс, отвечающий всем задачам системы и учитывающий психофизиологические особенности тестируемой категории пользователей. Созданная информационная система диагностики уровня развития детей дошкольного возраста позволяет осуществить раннюю диагностику их состояния, устанавливает наличие того или иного дефекта развития, определяет характер, структуру, качественные и количественные показатели, которые могут служить основанием для последующей коррекционной работы.

Ключевые слова: диагностика уровня развития, *intellectual disabilities*, компьютерная диагностика, *user experience*, особенности восприятия информации, тестовый модуль, обработка данных.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие исследователи большое внимание уделяют вопросам изучения нарушений интеллектуального развития (*intellectual disabilities*) детей дошкольного возраста [1, 3]. Ряд исследований зарубежных специалистов посвящен изучению проблем и расстройств обучения, на основе которых реализованы программные системы обучения детей с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) через игровой процесс [2, 3]. Однако данные исследования, как правило, направлены на узкую категорию нарушений в развитии, при этом практически не рассматриваются вопросы диагностики уровня развития детей дошкольного возраста.

Ранняя диагностика нарушений познавательной деятельности детей чрезвычайно сложна и в то же время крайне необходима [4]. Одной из важнейших задач диагностики является отграничение умственной отсталости от сходных с ней состояний. Любое отклонение от нормы требует достаточного изучения, отграничения от схожих состояний. Это необходимо для выбора подходящих коррекционных действий в процессе обучения.

Разработка компьютерных систем диагностики детей дошкольного возраста позволяет:

- выявлять уровень общих умственных способностей детей;
 - оценивать уровень развития психических и психофизиологических свойств личности: памяти, внимания, восприятия, умственной работоспособности, интеллекта, эмоционального состояния, нервно-психического статуса, параметров морфофункциональной системы (моторики, быстроты движения и т. д.);
 - определения уровня психофизиологической и социальной готовности к поступлению детей в детский сад или школу (физического развития, заболеваемости, физической подготовленности, основных физиометрических параметров растущего организма, факторов риска);
 - осуществлять раннюю диагностику отклонения детей от нормального развития;
- использовать средства автоматизации обработки данных компьютерной системы диагностики, включая сбор, накопление, хранение, уточнение (обновление, изменение), получение данных о тестируемых и результатах тестирования.

Для создания системы компьютерной диагностики уровня развития детей с ОВЗ необходимо провести исследование способов взаимодействия детей данной категории с интерфейсом информационных систем и определить руководящие принципы разработки интерфейса программного приложения.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В понятие проектирования человеко-ориентированного пользовательского интерфейса включаются не только аспекты, установленные эргономикой (учет принципов восприятия, двигательных и познавательных навыков людей), но также эмоциональные и социальные факторы, а также общее отношение к процессу взаимодействия.

С позиции человеко-ориентированного проектирования, интерфейс должен воплощать опыт взаимодействия пользователя с информационной системой (user experience), т.е. обеспечивать восприятие и ответные действия пользователя, возникающие в результате использования или предстоящего использования программы [5].

Таким образом, для проектирования опыта взаимодействия пользователей с интерфейсом компьютерной системы диагностики уровня развития детей дошкольного возраста с ОВЗ необходимо провести исследование, целями которого являются:

- выявление целей и задач пользователей при работе с конкретной информационной системой;
- составление достаточно подробного описания характеристик пользователей.

Результат анализа деятельности пользователя должен ясно демонстрировать:

- операции, завершающие процесс выполнения задачи (обнаружение, поиск, сравнение, оценка, решение, ожидание), и индикаторы результата или успешности/ошибочности проделанной работы;
- отношения между пользователем и элементами интерфейса, обусловленные контекстом в котором выполняется задача.

III. ТЕОРИЯ

Исследование опыта взаимодействия пользователей с информационным продуктом позволяет осуществить качественное проектирование интерфейса с учетом запросов пользователей, их психофизиологических особенностей и условий работы.

Для проектирования опыта взаимодействия с интерфейсом программы диагностики, необходимо рассмотреть профили пользователей: педагоги–дефектологи (или родители) и дети с ОВЗ.

Следует отметить, что направляющее действие при взаимодействии с интерфейсом компьютерной системы диагностики осуществляется непосредственно педагогом или одним из родителей. Это связано с тем, что с учетом особенностей развития, дети с ОВЗ в еще большей мере, чем нормально развивающиеся, нуждаются в целенаправленном обучающем воздействии взрослого. Ученые, исследующие особенности развития детей с нарушением интеллекта, в первую очередь, отмечают у них патологическую инертность, отсутствие интереса к окружающему [2].

Особое внимание в проведенном исследовании было уделено вопросам психофизиологических особенностей восприятия информации детьми с ОВЗ с учетом различных видов отклонений в развитии, так как они влияют на процесс взаимодействия ребенка с тестовым модулем. Эти особенности являются основой при создании графических элементов интерфейса и образовательного контента, учитываются при разработке схемы расположения данных элементов на экранной форме приложения.

При рассмотрении особенностей восприятия информации детьми с ОВЗ, прежде всего, необходимо упомянуть сниженную способность к приему и переработке информации по сравнению с наблюдаемой у нормально развивающихся детей. При всех типах нарушенного развития объем информации, который может быть принят в единицу времени, в той или иной мере меньше по сравнению с нормой. Кроме того, повышение порогов чувствительности (например, при снижении слуха) приводит к росту уровня шумов, что влияет на точность принимаемой информации, ведет к ее искажениям [5].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Интерфейс компьютерной системы диагностики должен обеспечивать возможность его адаптации к потребностям и характеристикам пользователя:

интерфейс должен быть предсказуемым и интуитивно понятным, должен предоставлять доступ ко всем необходимым функциям;

цвета должны быть подобраны так, чтобы облегчить восприятие информации и привлекать внимание ребенка к тестовому заданию;

графика, используемая при создании интерфейса и тестовых заданий, должна при запуске приложения на мониторах с различным разрешением оставаться неизменного качества изображения, чтобы обеспечивать способность достоверного отображения элементов;

тестовое задание должно занимать большее пространство экранной формы, чем остальные элементы управления интерфейсом, чтобы ребенок концентрировался только на нем. Предмет и объекты тестового задания должны быть изображены просто, но в то же время без лишней детализации.

Проведенные исследования показали, что у детей с нарушениями интеллектуального развития отмечаются сниженные возможности полноценного восприятия информации.

Процесс восприятия информации у детей дошкольного возраста с ОВЗ характеризуется следующими особенностями:

- трудностями выделения фигуры на фоне;
- затруднениями при различении близких по форме фигур и выделении детали рассматриваемого объекта;
- недостатками восприятия глубины пространства;

- трудностями в определении удаленности предметов;
- трудностями в зрительно-пространственной ориентировке.

Существующие проблемы приводят к тому, что ребенку с интеллектуальными особенностями в развитии для усвоения способов ориентировки в окружающем пространстве, для выделения и фиксации свойств и отношений предметов, для понимания того или иного действия требуется гораздо больше времени, чем нормально развивающемуся ребенку.

Поэтому при разработке способа взаимодействия с интерфейсом необходимо отдать предпочтение методам, помогающим наиболее полно передавать, воспринимать, удерживать и перерабатывать информацию в доступном для детей виде, в соответствии с природой особых образовательных потребностей.

В результате исследования были выявлены особенности восприятия информации детьми с ОВЗ (табл. 1), которые необходимо учесть при разработке модели взаимодействия пользователя с интерфейсом тестового модуля, чтобы сделать интерфейс удобным и понятным [6].

Основная задача компьютерной системы диагностики состоит в выявлении нарушений психического развития детей для определения и проведения дальнейших коррекционных мероприятий.

Разработанный диагностический комплекс представляет из себя программную оболочку, содержащую в себе игровые тесты, выполненные в виде независимых модулей, разделенных по смысловым категориям. Всего в комплексе четыре категории заданий: сенсорное восприятие, мышление, память, элементарные количественные представления (рис. 1).

ТАБЛИЦА 1
ОСОБЕННОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ИНФОРМАЦИИ ДЕТЬМИ С ОВЗ

Вид отклонения	Особенности восприятия	Пути решения
Умственно отсталые дети (дети-олигофрены)	Внимание характеризуется небольшим объемом, неустойчивостью, трудной переключаемостью	Рассмотрение небольшого количества простых объектов
	Отсутствие интереса к учебе, познанию	Использование развивающих компьютерных игр
	Замедленность зрительного восприятия	Индивидуальное регулирование времени рассмотрения объектов
	Недостаточная дифференцированность восприятия по спектру цветов и цветовых оттенков	Использование немного-красочных объектов преимущественно основных цветов
	Отсутствие способности выделить характерные части объекта, своеобразие строения	Использование объектов простых форм с постепенным усложнением
	Затруднение в восприятии сюжетных картин	Использование изображений с упрощенной сюжетной линией
	Снижена возможность запоминания перечня объектов (7±2 у нормальных против 3)	Обеспечение одновременного присутствия небольшого количества предметов простой формы
	Избирательно запоминание предметов, привлекающих внимание	Изучаемый предмет должен быть простым по форме и ярким по цвету
	Недостаточность всех уровней мыслительной деятельности, неспособность сравнивать объекты, описывать сюжетные изображения	Небольшое количество исследуемых предметов, простые в описании сюжетные линии без абстракций
	Неспособность интерпретации восприятия к переменным условиям	Предварительная подготовка к возможной смене ситуации
Умственно отсталые дети (дети-олигофрены)	Недифференцированность слухового восприятия, плохое восприятие близких по звучанию фонем	Четкие лаконичные комментарии (возможно в рифмованной форме)
	Трудности выделения фигуры на фоне	Соотнесение фона и формы по цвету, фактуре, наличию мелких элементов
	Затруднения сравнения близких по форме фигур	Фигуры с небольшим количеством заметных отличий
	Недостатки восприятия глубины пространства	Четко продуманное расположение объектов

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ 1

Вид отклонения	Особенности восприятия	Пути решения
Дети с задержкой психического развития	Трудности в восприятии отдельных элементов в сложном изображении	Изображения с небольшим количеством элементов
	Недостаток в восприятии близких по начертанию букв	Использование специальной текстовой информации
	Затруднения в дифференциации речевых звуков	Четкий, лаконичный комментарий, возможно повторяемый
	Зависимость степени восприятия от условий внешней среды	Обеспечение достаточной освещенности, комфортного положения во время изучения
	Несформированность наблюдения как систематического и целенаправленного восприятия	Ограничение длительности восприятия информации посредством наблюдения
	Недостаток внимания как деятельности субъекта на каком-либо объекте	Ограничение длительности восприятия изучаемого объекта
	Преобладание наглядно-образной памяти по сравнению со словесной (что соответствует норме)	Развитие посредством созерцания различных объектов
	На ранних этапах не испытывают затруднений в познавательной деятельности	Специализация комментариев, замена текстовой и изобразительной информацией
	Затруднения в целостном восприятии, анализе и сравнении объектов	Увеличения количества слуховой информации
	В условиях необходимости осмысления мало-знакомых ситуаций уровень мыслительных процессов значительно снижается	Предварительная подготовка к восприятию
Дети с нарушениями слуха	Выраженные затруднения в складывании разрезных картинок и расположении сюжетных картин в серии	Использование небольшого количества частей изображений с постепенным увеличением
	Низкая познавательная активность, недостатки памяти и внимания	Увеличение познавательной активности посредством развивающих игр
Дети с нарушением зрения	Затруднения в целостном восприятии, анализе и сравнении объектов	Увеличение количества слуховой информации
	В условиях необходимости осмысления мало-знакомых ситуаций уровень мыслительных процессов значительно снижается	Предварительная подготовка к восприятию
Дети с церебральным параличом	Выраженные затруднения в складывании разрезных картинок и расположении сюжетных картин в серии	Использование небольшого количества частей изображений с постепенным увеличением
Дети с церебральным параличом	Низкая познавательная активность, недостатки памяти и внимания	Увеличение познавательной активности посредством развивающих игр

Разработанная структурная схема тестовых модулей диагностического приложения для детей ОВЗ представлена на рис. 2.

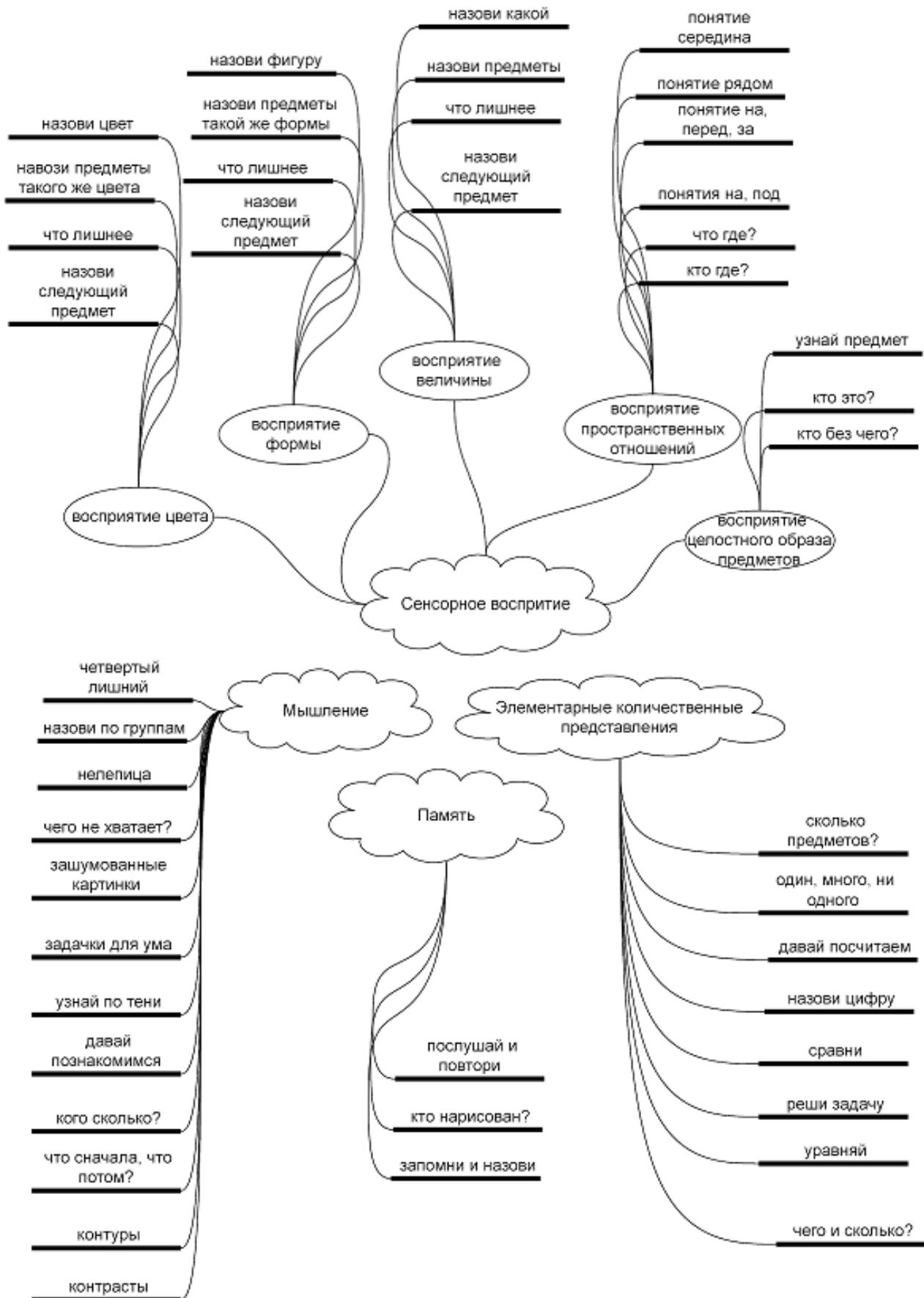


Рис. 1. Диаграмма тестовых заданий системы диагностики

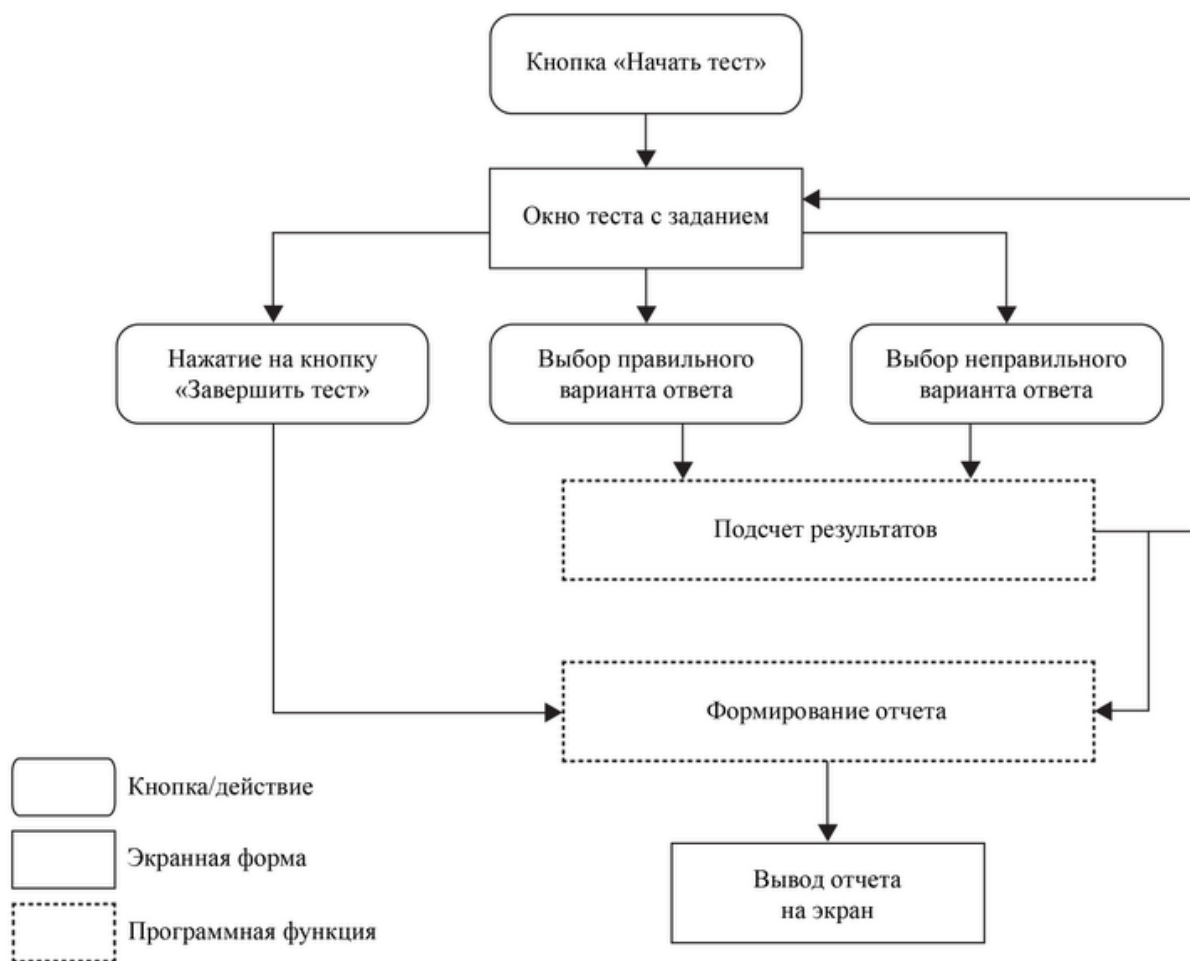


Рис. 2. Структурная схема тестовых модулей

Представленные в табл. 1 особенности восприятия информации детьми с ОВЗ позволили разработать принципы проектирования пользовательских интерфейсов, которые полностью учитывают психологическое восприятие информации у детей и были применены в разработке интерфейса тестовых модулей компьютерной системы диагностики уровня развития детей дошкольного возраста [7]:

- фон и фигуры на нем должны контрастировать по цвету, размеру, фактуре;
 - в графике использовать простые формы, все объекты должны быть прорисованы чётко, но без лишних деталей;
 - цветовая схема должна быть простая, без сложных оттенков, используются только естественные цвета;
 - использовать навигационные меню, выполненные с использованием графических элементов – пиктограмм;
 - использовать навигационные элементы стандартной формы и большого размера, которые легко заметить и найти;
 - экранные формы в целом и их объекты в частности не должны содержать большое количество элементов – не более 7;
 - использовать легко читаемый шрифт, количество используемых в оформлении интерфейса шрифтов не должно быть более 3, и все они должны быть одинаковыми по стилю;
 - использовать яркий большой курсор для привлечения внимания;
 - расположение объектов должно быть простым с соблюдением размерного соотношения объектов;
- 1) озвучивать название разделов в навигационном меню, обязательно осуществлять звуковое сопровождение действий ребенка во время взаимодействия с программой.

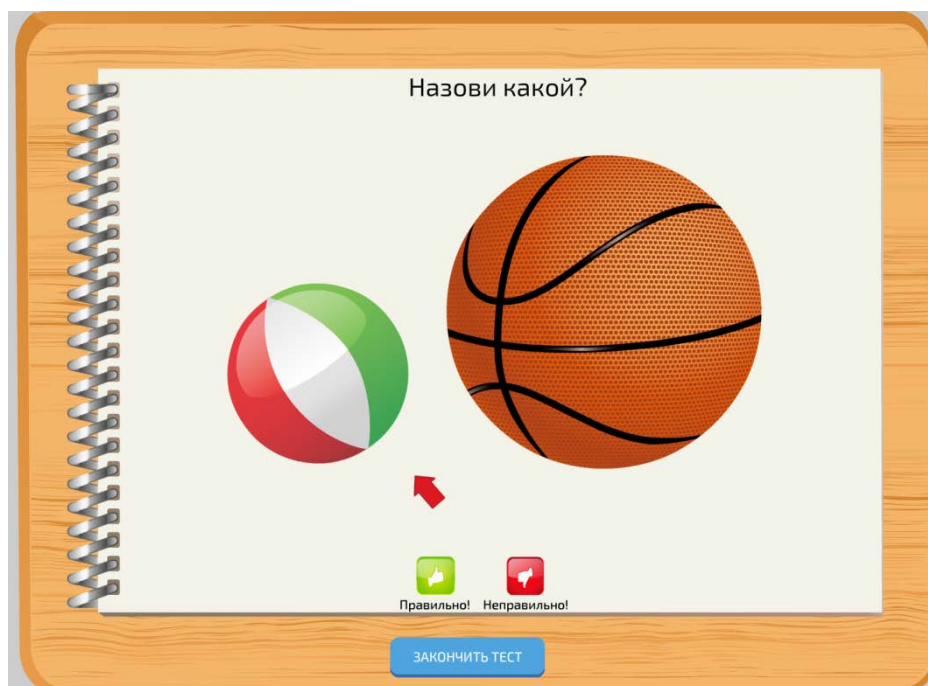


Рис. 3. Тестовый модуль оценки сенсорного восприятия величины объектов

Каждый тестовый модуль представлен в виде отдельной экранной формы. Помимо модулей, в приложении организован доступ к вводу входных данных пользователем, показу результатов работы каждого модуля, выводу результатов проведения диагностики. При этом программа фиксирует заданные параметры каждого тестового модуля, сохраняет их в базе данных, обрабатывает результаты и сохраняет их в памяти компьютера.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования особенностей восприятия информации детьми дошкольного возраста с различными отклонениями в интеллектуальном развитии позволили сформировать принципы для разработки пользовательского интерфейса компьютерной системы диагностики уровня развития, адаптированного под психофизиологические особенности детей дошкольного возраста с ОВЗ, которые определили способ взаимодействия с информационной системой.

Разработанная компьютерная система диагностики прошла пробное тестирование на базе образовательного учреждения Омской области «Детский дом №3 для детей с ограниченными возможностями здоровья» и получила положительные результаты, которые показали принципиально новые возможности в диагностике:

адаптивное тестирование (вид теста, в котором каждое последующее задание выбирается в зависимости от ответов на предыдущие задания, последовательность заданий и их количество в таком виде теста определяется динамически);

использование временных параметров;

использование мультимедийных стимулов, средств виртуальной реальности, игровой мотивации;

создание экспертных и обучающих систем;

самоконтроль поведенческого реагирования.

Опыт работы с данной компьютерной системой диагностики позволил сформулировать некоторые ощутимые положительные эффекты, полученные педагогами по результатам использования данного приложения:

повышение эффективности работы педагога за счет с использованием средств автоматизации обработки данных и получения результатов тестирования;

возможность систематически накапливать и хранить не только данные об испытуемом, но и сами результаты тестирования, тем самым решая проблему потери информации;

предоставление психологу возможности сконцентрироваться на решении сугубо профессиональных задач благодаря освобождению его от трудоемких рутинных операций первичной обработки данных;

повышение четкости, тщательности и чистоты психологического исследования за счет увеличения точности регистрации результатов и исключения ошибок обработки исходных данных, неизбежных при ручных методах расчета выходных показателей;

использование времени не только как управляемого параметра теста (исследователь с помощью компьютера способен регулировать и устанавливать требуемый темп психодиагностического тестирования), но и в качестве диагностического параметра (например, показатели временной динамики ответов ребенка на вопросы психодиагностического теста могут выступать как индикаторы утомления, эмоционального шока и т.п.) [5];

возможность проводить в сжатые сроки массовые психодиагностические исследования путем одновременного тестирования многих испытуемых.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-47-550894.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giaouri S., Alevriadou A. Are children with Down syndrome susceptible to visual illusions? // *Procedia Social and Behavioral Sciences* 15 (WCES-2011). 2011. P. 1988–1992.
2. Ferreira J. M., Mäkinen M., Amorim K. de S. Intellectual disability in kindergarten: possibilities of development through pretend play // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2016. 217. P. 487–500.
3. Isasi A. R., Basterretxea A. L., Zorrilla A. M., Zapirain B. G. (2013) Helping children with Intellectual Disability to understand healthy eating habits with an iPad based Serious Game // *The 18th International Conference on Computer Games, CGAMES 2013*. P. 169–173.
4. ISO 9241-210:2010. Ergonomics of human-system interaction - Part 210: Human-centered design for interactive systems.
5. Стребелева Е. А. Формирование мышления у детей с отклонениями в развитии: кн. для педагога-дефектолога. М.: Гуманитар. изд. центр ВЛАДОС, 2005. 180 с.: ил.
6. Батенькина О. В. Определение критериев юзабилити компьютерных игр для детей с проблемами в развитии // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2012. Кн. 5. С. 214–219.
7. Батенькина О. В. Дизайн интерфейса обучающих программ для детей с задержкой психологического развития. М.: Магистр, 2014. 112 с.

УДК 528.854

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СТАНДАРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ СКРЫТОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

В. И. Васильев¹, А. В. Еременко², А. Е. Сулавко³, С. С. Жумажанова³

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

²Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

³Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Предложен способ скрытой непрерывной идентификации пользователей компьютерных систем в процессе их профессиональной деятельности при помощи только данных от стандартных периферийных устройств. Проведен натурный эксперимент по оценке надежности предложенного способа. Полученные результаты позволяют заключить, что приблизиться по надежности распознавания субъектов к методам идентификации на основе открытых биометрических образов (например, отпечатку пальца) с использованием стандартного оборудования (клавиатура, мышь, веб-камера) возможно.

Ключевые слова: особенности работы с мышью, клавиатурный почерк, параметры лица, непрерывная идентификация сотрудников, модифицированная формула Байеса.

И. ВВЕДЕНИЕ

Проблема разграничения доступа к информационным ресурсам решается уже на протяжении десятилетий. Все больше интернет-сервисов (Yahoo!, Google и др.) отказываются от использования паролей в пользу альтернативных способов аутентификации, в том числе и биометрических [1]. Однако существующие подходы к идентификации и аутентификации не учитывают того факта, что авторизованный пользователь сам может являться злоумышленником либо от его имени может действовать другое лицо. Допущенный к информации субъект может неумышленно (по халатности или ошибке) передать ее (документ, файл) третьим лицам, не имеющим санкционированного доступа к ней.

Обратимся к мировой статистике компьютерных преступлений. По данным глобального исследования информационной безопасности предприятий, проводимого ежегодно PricewaterhouseCoopers (PwC), число инцидентов, связанных с нарушением информационной безопасности, и размеры причиняемого ими ущерба неуклонно растут [2]. Согласно приведенному исследованию в 2009 году PwC зафиксировано 3,4 млн. инцидентов, в 2010 – 9,4 млн, в 2011 – 22,7 млн, в 2012 – 24,9 млн, в 2013 – 28,9 млн, в 2014 – 42,8 млн. Совокупный среднегодовой прирост числа инцидентов информационной безопасности составляет 66%. При этом оценки среднего ущерба от одного инцидента ИБ таковы: для малых компаний (доходы менее 100 млн долларов США) – 0,41 млн долларов США, для средних (доходы от 100 млн до 1 млрд долларов США) – 1,3 млн. долларов США, для крупных (доходы свыше 1 млрд долларов США) – 5,9 млн долларов США. Таким образом, данные на 2015 год говорят о ежегодном увеличении убытков от нарушений информационной безопасности. Большая часть данных убытков по данным исследования PwC – собственные или бывшие сотрудники компаний. В 2014 году процентная доля руководителей, обвиняющих действующих сотрудников своей компании, возросла на 10% по сравнению с 2013 годом. В США за 2014 год почти треть респондентов (32%), участвовавших в исследовании, заявили, что преступления, связанные с действиями «инсайдеров», дороже обходятся компании по сравнению с инцидентами, в которых виновны «чужие».

Переломить ситуацию возможно, если провести модернизацию систем безопасности, в том числе по следующему направлению: организовать скрытую непрерывную высоконадежную идентификацию сотрудников в процессе профессиональной деятельности. В качестве биометрических признаков в настоящей работе предлагается использовать параметры лица и подсознательных движений субъекта: клавиатурного почерка, особенностей мимики, а также работы пользователя с компьютерной мышью. Подделать все указанные признаки на практике не представляется возможным. Информативность этих признаков зависит от длительности наблюдения: чем дольше осуществлялся скрытый мониторинг пользователя компьютерной системы, тем больше информации имеется для его идентификации. Кроме того, психофизиологическое состояние отражается на динамике подсознательных движений субъекта [3], что может дать потенциальную возможность оценки лояльности действий субъекта по совокупности этих признаков. Если в процессе работы за компьютером окажется неизвестный субъект, пытающийся осуществить доступ к конфиденциальной информации, эти данные могут быть заменены на неактуальные. При этом их владельцу по доступным каналам связи будет передано сообщение о производимой в данный момент атаке, содержащее фото нарушителя. Практически любой современный персональный компьютер или ноутбук снабжен веб-камерой, однако качество изображений, полученных при помощи таких средств, как правило, очень низкое. Возможно ли обеспечить надежность распознавания, близкую к уровню биометрических систем на основе статических признаков (отпечаток пальца, радужка и др.), используя только стандартное периферийное оборудование? Цель настоящей работы: дать оценку потенциала данных, поступающих от стандартных периферийных устройств, для их использования в целях идентификации пользователей компьютерных систем. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

1. Собрана база данных биометрических образцов.
2. Выявлены признаки, характеризующие пользователей компьютерных систем.
3. Предложена методика создания эталонов пользователей компьютерных систем в процессе профессиональной деятельности.
4. Разработан способ скрытой идентификации пользователей компьютерных систем по особенностям их работы с клавиатурой и мышью, физиологическим особенностям и мимике лица.
5. Оценена эффективность разработанного способа.

II. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

6. База биометрических образцов

Для проведения исследовательской работы собраны биометрические образцы 80 испытуемых. Известно, что скорость воспроизведения подсознательных движений субъектом зависит от типа темперамента. Поэтому среди испытуемых было равное количество представителей каждого типа темперамента и пола. Все испытуемые выполняли тестовые задания на компьютере, при этом осуществлялась скрытая регистрация параметров их клавиатурного почерка, координаты перемещения курсора мыши и скрытая видеосъемка с использованием разработанного программного модуля. Длительность тестового задания составляла 30 минут. В ходе выполнения заданий у испытуемых появлялась необходимость передвижения курсора мыши между элементами пользовательского интерфейса, ввода текста на клавиатуре, а также в процессе демонстрировались изображения, вследствие чего, субъект вынужден был смотреть на экран. Локализацию лица удалось выполнить на 19% кадров (субъекты не всегда смотрели в сторону объектива). Частота съемки составила 15 кадров в секунду с разрешением видео 800x600.

7. Идентификационные признаки

В качестве признаков лица рассматривались следующие величины:

- расстояния между глазами, правым глазом и центром лица, правым глазом и кончиком носа, правым глазом и центром рта, левым глазом и центром лица, левым глазом и кончиком носа, левым глазом и центром рта, центром рта и центром лица, кончиком носа и центром рта;
- площади правого глаза, левого глаза, носа, рта;
- коэффициенты корреляции изображений в RGB-диапазоне правого и левого глаза, правого глаза и носа, правого глаза и рта, левого глаза и носа, левого глаза и рта, носа и рта каждого кадра, на котором удалось локализовать лицо;
- коэффициент корреляции изображений в RGB-диапазоне правого глаза, левого глаза, носа, рта двух соседних кадров, на которых удалось локализовать лицо.

Данные признаки характеризуют физиологические особенности лица, мимики [4–7] и асимметрию лиц субъектов [8]. При анализе изображений использовался каскадный детектор объектов, основанный на алгоритме Виолы–Джонса, позволяющий обнаруживать объекты на изображениях в реальном времени [9] (рис. 1).

Все испытуемые обладали средними навыками работы с клавиатурой или выше (скорость набора текста 100 символов в минуту или больше). Начальный этап обработки данных в задаче идентификации пользователя по клавиатурному почерку является фильтрация – удаление информации о клавишах управления курсором, функциональных клавишах и т.д. После этого выделяется информация, относящаяся к следующим характеристикам пользователя: количество ошибок при наборе, интервалы между нажатиями клавиш, время удержания клавиш, число «перекрытий» между клавишами, степень ритмичности при наборе, скорость набора. Далее в качестве признаков клавиатурного почерка решено использовать только времена удержания (нажатия) клавиш и относительное количество «перекрытий» клавиш (когда одна клавиша еще не отпущена, а следующая уже нажата). В силу специфики поставленных задач (скрытая идентификация в процессе профессиональной деятельности подразумевает ввод идентифицируемым субъектом произвольного текста) использовать паузы между нажатием сложно, т.к. требуется слишком долгая процедура обучения (пользователь должен напечатать большой объем текстов для создания эталона всех информативных сочетаний клавиш). Паузы между нажатием целесообразно использовать при осуществлении явной (не скрытой) идентификации/аутентификации по динамике набора парольной фразы, где создается эталон конкретной парольной фразы путем многократного ее ввода. Решено формировать эталоны только тех клавиш, количество нажатий которых является достаточным (при количестве нажатий от 20 до 30, как правило, с вероятностью более 0,95 можно утверждать, что генеральная совокупность подчинена такой же закономерности, как и данная выборка). Для каждой клавиши и субъекта это количество определялось индивидуально исходя из закона больших чисел.

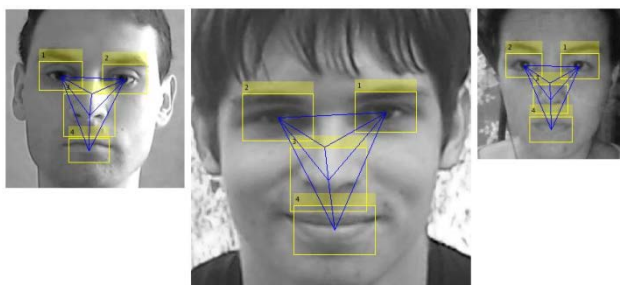


Рис. 1. Выделение признаков в кадре видеозаписи

По закону Фиттса [10], чем дальше или точнее выполняется движение руки субъекта, тем больше коррекции необходимо для его выполнения и, соответственно, больше времени требуется субъекту для внесения этой коррекции. При внесении коррекции движений проявляются индивидуальные особенности человека, работающего с манипулятором «мышь». Время, затрачиваемое на перемещение курсора мыши, в соответствии с законом Фиттса можно вычислить по формуле (1). Фактическое время перемещения также можно вычислить в процессе мониторинга пользователя. Таким образом, время запуска/остановки движения можно вычислить по формуле (2) и использовать как идентификационную характеристику.

$$T = a + b \cdot \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (1)$$

где T – время, затрачиваемое на совершение действия, a – время запуска/остановки движения, b – величина, зависящая от типичной скорости движения, D – дистанция от точки старта до центра цели, W – ширина цели, измеренная вдоль оси движения.

$$a = T - b \cdot \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (2)$$

где T – регистрируемое в процессе скрытого мониторинга время, затрачиваемое на совершение перемещения курсора мыши, b – величина, зависящая от типичной скорости движения курсора мыши (вычисляется как отношение средней скорости движения мыши по экрану, осуществляемого субъектом, к установленному в операционной системе коэффициенту чувствительности мыши), D – дистанция между элементами интерфейса (в пикселях), W – ширина элемента интерфейса, к которому направляется курсор (в пикселях).

Также в качестве признаков предлагается использовать амплитуды первых четырех низкочастотных гармоник функции скорости перемещения курсора мыши по экрану $V_{xy}(t)$ и функций координат перемещения курсора $x(t)$ и $y(t)$. Разложение функции $V_{xy}(t)$ производится с помощью быстрого преобразования Фурье. Для масштабирования сигналов по продолжительности производилось прямое преобразование функций в ряд Фурье и обратное преобразование с одинаковой длительностью – передискретизация (равной средней продолжительности масштабируемых сигналов). Каждый участок приводится к длительности в 0,5 секунд. Амплитуды нормируются $A^* = A/E_s$ по энергии функции $V_{xy}(t)$, вычисляемой как сумма квадратов амплитуд сигнала $V_{xy}(t)$. Данная операция осуществляется для того, чтобы привести все траектории перемещений курсора между элементами интерфейса к единому масштабу. Аналогичные операции осуществляются по отношению к функциям $x(t)$ и $y(t)$.

Имеется погрешность измерения признаков (обусловленная такими случайными факторами как произвольные и непроизвольные движения головы субъекта, тремор, моргание глаз, нестабильность клавиатурного почерка и т.д.). Поэтому следует воспринимать признаки как случайные величины. На основе метода Хи-квадрат Пирсона подтверждена гипотеза о нормальном распределении перечисленных признаков.

8. Методика формирования эталонов и решений

Для формирования эталона необходимо вычислить параметры распределения (в данном случае нормального) значений признаков. Более удобным при реализации процедуры создания эталона в реальном времени является рекуррентное вычисление математического ожидания и среднеквадратичного отклонения.

В процессе идентификации на основе вновь поступающих значений признаков могут быть вычислены плотности вероятности данных значений. Таким образом, целесообразно подобрать алгоритм принятия решений, который мог бы «интегрировать» данные плотности для получения финальной степени близости работающего в системе субъекта к эталонам известных пользователей.

В работе [3] предложена модифицированная формула гипотез Байеса, которая существенно снижает количество ошибок при идентификации образов в пространстве малоинформативных признаков. Алгоритм последовательного применения формулы Байеса заключается в вычислении интегральных апостериорных вероятностей гипотез за некоторое число шагов равное количеству признаков. Каждая гипотеза подразумевает, что предъявляемые данные о подсознательных движениях принадлежат определенному субъекту, т.е. каждая гипотеза ассоциируется с определенным эталоном субъекта. На каждом шаге за априорную вероятность принимается апостериорная вероятность, вычисленная на предыдущем шаге. Новый шаг алгоритма воспроизводится в тот момент, когда происходит событие, при котором поступает новая информация о пользователе (нажатие клавиши, движение курсора мыши от одного элемента интерфейса к другому и т.д.), в формулу Байеса поступают данные о том признаке, с которым связано произошедшее событие. Данный алгоритм целесообразно применить в настоящем исследовании, но вместо классической формулы гипотез Байеса предлагается использовать модифицированную формулу (3), основанную на схожей формуле из [3] и адаптированной для текущей задачи.

$$P_j(H_i|A) = P_{j-1}(H_i|A) + \left(\frac{P_{j-1}(H_i|A)P(A_j|H_i)}{\sum_{i=1}^n P_{j-1}(H_i|A)P(A_j|H_i)} - P_{j-1}(H_i|A) \right) \times \left(1 - \sum_{i=0}^n Sum_{ji} \right) \quad (3)$$

где Sum_{ji} сумма ошибок 1-го и 2-го рода при идентификации i -й гипотезы по j -му признаку, $P_{j-1}(H_i/A)$ – апостериорная вероятность i -й гипотезы, вычисленная на $j-1$ шаге. Сумму ошибок можно вычислить как площадь пересечения функций плотностей вероятности соответствующего признака. На первом шаге все гипотезы (субъекты) считаются равновероятными, т.е. $P_0(H_i/A) = 1/n$, где n – количество идентифицируемых субъектов. Условные вероятности вычисляются исходя из нормального закона распределения. Чтобы отличить известного

пользователя от неизвестного системе устанавливается пороговое значение апостериорных вероятностей гипотез. При преодолении данного значения определенной гипотезой, субъект, ассоциируемый с данной гипотезой, считается идентифицированным. В противном случае работающий в системе субъект воспринимается как неизвестный.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметрами надежности биометрической системы являются: вероятность или процент ошибок ложного отказа в допуске FRR и вероятность или процент ошибок ложного допуска FAR. При $FRR=FAR=ERR$ говорят о коэффициенте равной вероятности ошибок ERR.

Был проведен следующий эксперимент. В аудитории с 12 компьютерами, на которых установлено идентичное периферийное оборудование (клавиатура, мышь и веб-камера) 12 испытуемых выполняли тестовые задания в течение 30 минут. За это время были созданы эталоны данных пользователей. На втором этапе эти испытуемые работали над решением аналогичных задач в течение 7 часов, делая перерывы каждые 30 минут (общее время перерывов составило не более 2 часов). Данные накапливались для дальнейшего анализа. На третьем этапе были приглашены другие испытуемые, также проработавшие в течение 7 часов над решением аналогичных задач, за исключением того, что для них не создавался эталон. Третий этап состоял из пяти таких итераций, т.е. 5 раз приглашались субъекты, работавшие по 7 часов. Данные мониторинга были разделены на образцы длительностью по 10 минут. Таким образом, было создано 12 эталонов известных пользователей и собрано 360 реализаций биометрических данных известных субъектов (по 30 биометрических образцов на каждого из 12) и 1800 реализаций неизвестных субъектов (по 30 биометрических образцов на каждого из 60). На основе полученных данных проведены расчеты с использованием разработанного метода идентификации. Результаты приведены в табл. 1 и на рис. 2 и 3.

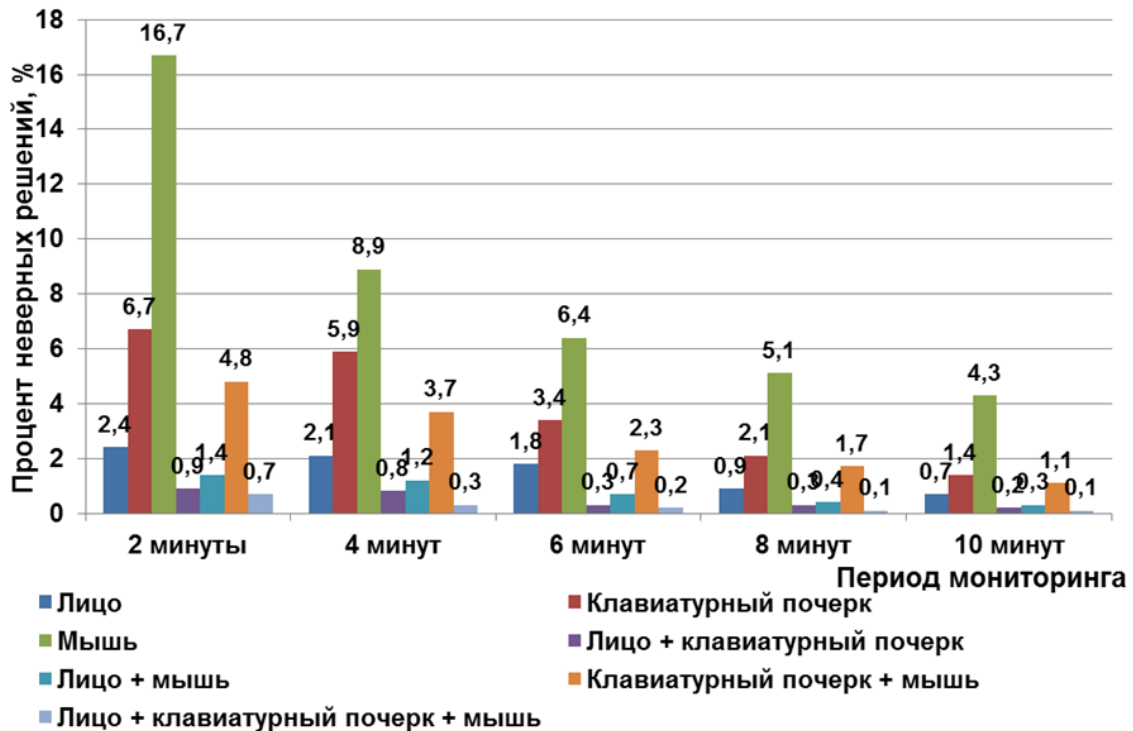


Рис. 2. Вероятности ошибки второго рода

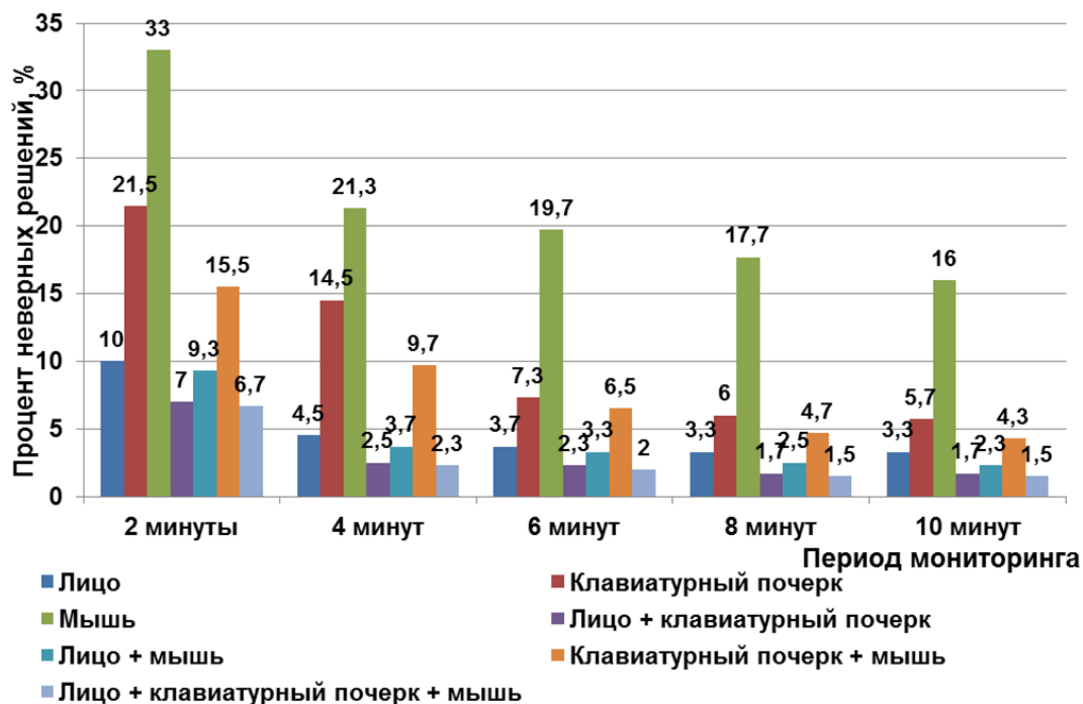


Рис. 3. Вероятности ошибки первого рода

ТАБЛИЦА 1

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Признаки	Тип ошибки	Время мониторинга пользователей, минут				
		2	4	6	8	10
Лицо	FRR, %	10	4,5	3,7	3,3	3,3
	FAR, %	2,4	2,1	1,8	0,9	0,7
Клавиатурный почерк	FRR, %	21,5	14,5	7,3	6	5,7
	FAR, %	6,7	5,9	3,4	2,1	1,4
Мышь	FRR, %	33	21,3	19,7	17,7	16
	FAR, %	16,7	8,9	6,4	5,1	4,3
Лицо + клавиатурный почерк	FRR, %	7	2,5	2,3	1,7	1,7
	FAR, %	0,9	0,8	0,3	0,3	0,2
Лицо + мышь	FRR, %	9,3	3,7	3,3	2,5	2,3
	FAR, %	1,4	1,2	0,7	0,4	0,3
Клавиатурный почерк + мышь	FRR, %	15,5	9,7	6,5	4,7	4,3
	FAR, %	4,8	3,7	2,3	1,7	1,1
Лицо + клавиатурный почерк + мышь	FRR, %	6,7	2,3	2	1,5	1,5
	FAR, %	0,7	0,3	0,2	0,1	0,1

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты позволяют заключить, приблизиться по уровню надежности распознавания субъектов к методам биометрической идентификации на основе открытых биометрических образов (например, отпечатку пальца) без использования специализированного периферийного оборудования возможно. Опираясь на оценки систем идентификации на базе статических признаков, сделанные из ряда натуральных экспериментов и описанные в работе [11] ($FAR \approx 0,01-0,001\%$ при $FFR \approx 2-10\%$), можно констатировать: за 8 минут непрерывной идентификации в пространстве малоинформативных динамических биометрических признаков почти удалось достигнуть нижней границы надежности распознавания, характерной для статической биометрии. Достовер-

ность данного результата для $FRR=0,015$ составляет 0,998 (при доверительном интервале 0,02) и 0,819 (при доверительном интервале 0,001) для $FAR=0,001$. Хотя результат был получен на ограниченном контингенте, потенциал стандартного периферийного оборудования можно назвать высоким.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Managing cyber risks in an interconnected world. Key findings from The Global State of Information Security Survey 2015. PricewaterhouseCoopers. URL: http://www.pwc.ru/ru_RU/ru/riskassurance/publications/assets/managing-cyber risks.pdf.
2. Biometrics for Mobile Devices: Global Market Analysis and Forecasts. Research and Markets report, February 2015. URL: http://www.researchandmarkets.com/research/chx7q6/biometrics_for. (дата обращения: 10.06.2015).
3. Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Samotuga A. E. Personal Identification and the Assessment of the Psychophysiological State While Writing a Signature // Information. 2015. № 6. P. 454–466.
4. Sinha P. Face Recognition by Humans: Nineteen Results All Computer Vision Researchers Should Know About // Proceedings of the IEEE. 2006. Vol. 94, no. 11. P. 1948–1962.
5. andeep Mishra, Anupam Dubey. Face recognition approaches: a survey // International Journal of Computing and Business Research (IJCBR), 2015. URL: <http://www.researchmanuscripts.com/January2015/1.pdf>.
6. Barr J. R., Bowyer K. W., Flynn P. J., Soma Biswas. Face recognition from video: a review // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, April 20, 2012. P. 1–6.
7. Shailaja A Patil, Pramod J Deore. Video-based face recognition: a survey // World Journal of Science and Technology. 2012. 2 (4). P.136–139.
8. Epifantsev B. N., Arkhipov A. A.. Informativeness of the Facial Asymmetry Feature in Problems of Recognition of Operators of Ergatic Systems. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2015. Vol. 51, no. 4. P. 1–8.
9. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001. Proceedings of the 2001: IEEE Computer Society Conference. 2001. Vol. 1. P. I, 511–I, 518.
10. Jef Raskin. The Human Interface. New Directions for Designing Interactive Systems. 2005. 272 p.
11. Bolle R. M., Connell J., Pankanti [et al.]. Guide to Biometrics. Springer, 2004. 364 p.

УДК 004.056

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ РАЗМЕЩЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ

О. Т. Данилова¹, З. В. Семенова²,

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Сибирская автомобильно-дорожная академия, г. Омск, Россия

Аннотация – целью данного исследования является детальное изучение вопросов проектирования систем физической защиты объекта информатизации. Для корректной формализации и составления алгоритма процедуры выбора оптимальной конфигурации системы безопасности с учетом расположения точек доступа и организации зон доступа на объекте применяется математический аппарат теории оптимизации и принятий решений. Результатом исследования является схема программной реализации системы принятия решения о размещении элементов системы контроля и управления доступом.

Ключевые слова: система физической защиты, система контроля и управления доступом, система принятия решений, задача оптимизации.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее эффективных и цивилизованных подходов к решению задачи комплексной безопасности объектов является применение таких систем физической защиты (СФЗ), которые включают комплекс средств контроля доступом (СКД), охранного телевидения (СОТ) и охранно-пожарных средства (ОПС). Здесь следует учесть, что проблема оптимального размещения элементов, составляющих СФЗ, встает уже на стадии предпро-

ектного исследования объекта, и решения, принимаемые на этом этапе в значительной степени определяют качество и надежность СФЗ.

Постановка задачи оптимизации и применяемые для ее решения методы зависят от степени неопределенности параметров, которыми оперирует система. Различают четыре типа задач. К задачам первого типа относятся задачи с детерминированными параметрами, а искомые решения являются непрерывными либо дискретными [1]. Задачи второго типа – это задачи принятия решений в условиях риска, характеризуются тем, что для ряда параметров неизвестны точные значения, а определены диапазоны их изменений [2]. Третий тип характеризуется тем, что для каждого из параметров заданы возможные дискретные значения и для них определены значения показателя эффективности, соответствующие каждому из вариантов альтернативных решений [3]. Четвертый тип задач отличается от других тем, что принятие решения лежит на некоем анализе в условиях конкуренции противоборствующих сторон и в качестве схемы принятия решений используется игровая модель [4]. Выбор метода оптимизации зависит от критерия и ограничений, а также от степени дискретности параметров и наличия информации об их вероятностных законах распределения.

Любой алгоритм отыскания оптимального решения для задачи минимизации функции на множестве обычно ориентирован на решение определенного класса задач оптимизации с определенными свойствами данной функции и множества. Поэтому более универсальные алгоритмы, ориентированные на решение более широких классов задач, обычно уступают по эффективности специализированным алгоритмам, использующим специфические свойства конкретно решаемой задачи. Так, одним из первых оптимизационных методов является метод полного перебора. Среди приближенных методов наиболее часто используются методы частичного перебора, методы отсечений, методы аппроксимаций, методы локальной оптимизации [5].

Проверка модели включает оценку ее непротиворечивости, чувствительности, реалистичности и работоспособности. Непротиворечивость предполагает логический анализ результатов моделирования при варьировании исходных параметров. Детальной оценке подвергаются результаты оптимизационных расчетов для предельных значений параметров. Чувствительность основана на анализе изменения характеристик системы и показателя эффективности при наибольших вариациях управляемых параметров. Одним из методов проверки реалистичности модели является установление соответствия результатов моделирования известным частным случаям. Работоспособность модели связана с оценкой ресурсов, необходимых для сбора исходных и проведения машинных экспериментов [6].

Авторы настоящей работы считают, что на основе анализа расположения точек доступа и организации зон доступа на объекте представляется возможным определить рациональное размещение элементов системы его защиты. Объектом исследования при выполнении представляемой работы была выбрана интегрированная система контроля управления доступом (СКУД).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разрабатываемая система принятия решений (СПР) должна обеспечивать сбор и обработку входных данных; производить отображение, регистрацию и дальнейшее архивирование информации, с целью последующего ее использования. Основной целью создания данной СПР является необходимость ведения учета информации о состоянии и динамике объекта. Учетные данные системы могут быть подвергнуты автоматической обработке для последующего тактического и стратегического анализа с целью принятия управленческих решений [7].

Исходными данными для разработки СПР являются сведения об элементах и набор минимальных требований для характеристик элементов защиты на каждый элемент.

Изначально система должна осуществлять опрос, в ходе которого определяется категория рассматриваемого объекта и составляется реальная конфигурация системы.

На основе полученных данных должен быть сформирован запрос на составление оптимального состава системы относительно данной категории объекта. На данном этапе решается задача о построении оптимальной конфигурации системы.

После того как известны оптимальная и реальная конфигурации системы, необходимо выполнить их сравнение на обнаружение критических отличий.

III. ТЕОРИЯ

Задача рационального расположения элементов в системе защиты разделяется на три составные части: задачу выбора оптимальной конфигурации; задачу местоположения элементов СКУД на объекте доступа и задачу оптимального распределения ресурсов между составными частями системы.

Задача выбора оптимальной конфигурации формализуется следующим образом: берется конечное множество всех возможных элементов СКУД F , которое разбивается на ряд подмножеств G, Q, P , каждому из которых соответствует множество составных частей системы. Сама по себе постановка задачи оптимизации проста и естественна. Различают задачу оптимизации и индивидуальную задачу оптимизации. Пусть индивидуальная задача оптимизации для элементов СКУД – это пара (G, c) , где G – множество, область допустимых значений подмножества идентификаторов, а c – функция стоимости, осуществляющая отображение $c: G \rightarrow R^1$. Требуется найти точку $gl \in G$, для которой $c(gl) \leq c(y)$, для всех $y \in G$. Такая точка является глобально оптимальным решением для данной индивидуальной задачи оптимизации. Математическая формализация индивидуальной задачи приводит к ответу на вопрос: которое из i -х решений оптимально и отвечает требованиям соответствующего класса системы. Оптимальным является тот элемент, который будет отвечать условию $c[i] \times x[i] \rightarrow \min$.

Задачи расположения элементов на объекте и распределения ресурсов решаются с использованием положений теории графов. Каждый объект представляется как одна вложенная зона, т.е. содержащая в себе различные варианты других зон. В качестве вершин графа выбираются точки доступа на объекте, а в качестве ребер – соответственно переходы между этими точками доступа, т.е. пересечение зоны доступа. Для каждого ребра определяется категория доступа, которой оно соответствует. При построении древовидной схемы графа необходимо, учитывая приоритет категорий доступа (общего применения, важный, особо важный), определить, к какой категории относятся точки доступа на объекте [8].

Для решения задачи распределения ресурсов требуется так преобразовать веса ребер взвешенного двудольного графа, чтобы каждой вершине стало инцидентно хотя бы одно ребро нулевого веса и чтобы веса всех ребер при этом являлись не отрицательными. Пустое паросочетание M объявляется текущим. Если в графе все вершины насыщены относительно текущего паросочетания, то текущее паросочетание оптимально. Если нет, то нужно выбрать произвольную свободную вершину $b \in B$ и искать M – чередующуюся цепь, которая начинается в вершине b и состоит только из ребер нулевого веса. Как только такая цепь построена, то производится операция $M = M \oplus P$ и проводится проверка, все ли вершины насыщены относительно такого паросочетания. Если цепь не построена, то для множества вершин $b \in B'$, $a \in A'$, отмеченных в ходе поиска, определяется $d = \{\min c(b, a) | b \in B', A \in A \setminus A'\}$ и к графу применяется операция (B', d, A') . Из тех вершин $b \in B'$, которым стало инцидентно хотя бы одно ребро нулевого веса, возобновляется поиск M – чередующейся цепи с использованием только ребра нулевого веса. Если такая цепь P будет построена, то опять выполняется операция $M = M \oplus P$ и проверяется насыщение вершин. И так до тех пор, пока не будет найдено оптимальное паросочетание.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Решение вышеизложенных задач позволяет определить подходы к проектированию автоматизированной системы (АС), обеспечивающей сбор и обработку информации, на основе которой должно приниматься решение о соответствии предлагаемого проекта СКУД реальным условиям эксплуатации объекта информатизации.

Анализ структурной схемы зон доступа на объекте основывается на формировании совокупности точек доступа c СКУД и определяется как множество C , которому принадлежат эти точки доступа $c \in C$. Если объект имеет несколько структурных подразделений с разными категориями доступа в каждое из них, с учетом специфики функциональных особенностей объекта, то и СКУД имеет несколько подсистем, отличающихся категориями доступа зон и, соответственно, разными уровнями доступа пользователей (субъектов доступа). Тогда множество C разделяется на I подмножеств C_i с элементами c_i . Подмножества $C_i \subset C$, $i=1, \dots, I$ являются подмножествами множества C . Подмножество точек доступа C_i могут быть как пересекающимися, так и непересекающимися. Это зависит от того, имеют ли структурные подразделения общие зоны доступа и общие точки доступа. Вся совокупность зон доступа z всей СКУД может быть определена множеством Z , которому принадлежат эти точки доступа $z \in Z$. В свою очередь, множество Z , в общем случае, разделяется на J подмножеств Z_j с элементами z_j . Подмножества $Z_j \subset Z$, $j=1, \dots, J$ являются собственными подмножествами множества Z .

Для формирования зон доступа необходимо представить систему контроля и управления доступом на объекте в виде графа. Одной из главных целей размещения является создание наилучших условий для выполнения функций контроля и управления доступом. Каждая точка доступа должна быть оснащена определенным набором элементов, которые по своим характеристикам должны соответствовать данной категории доступа.

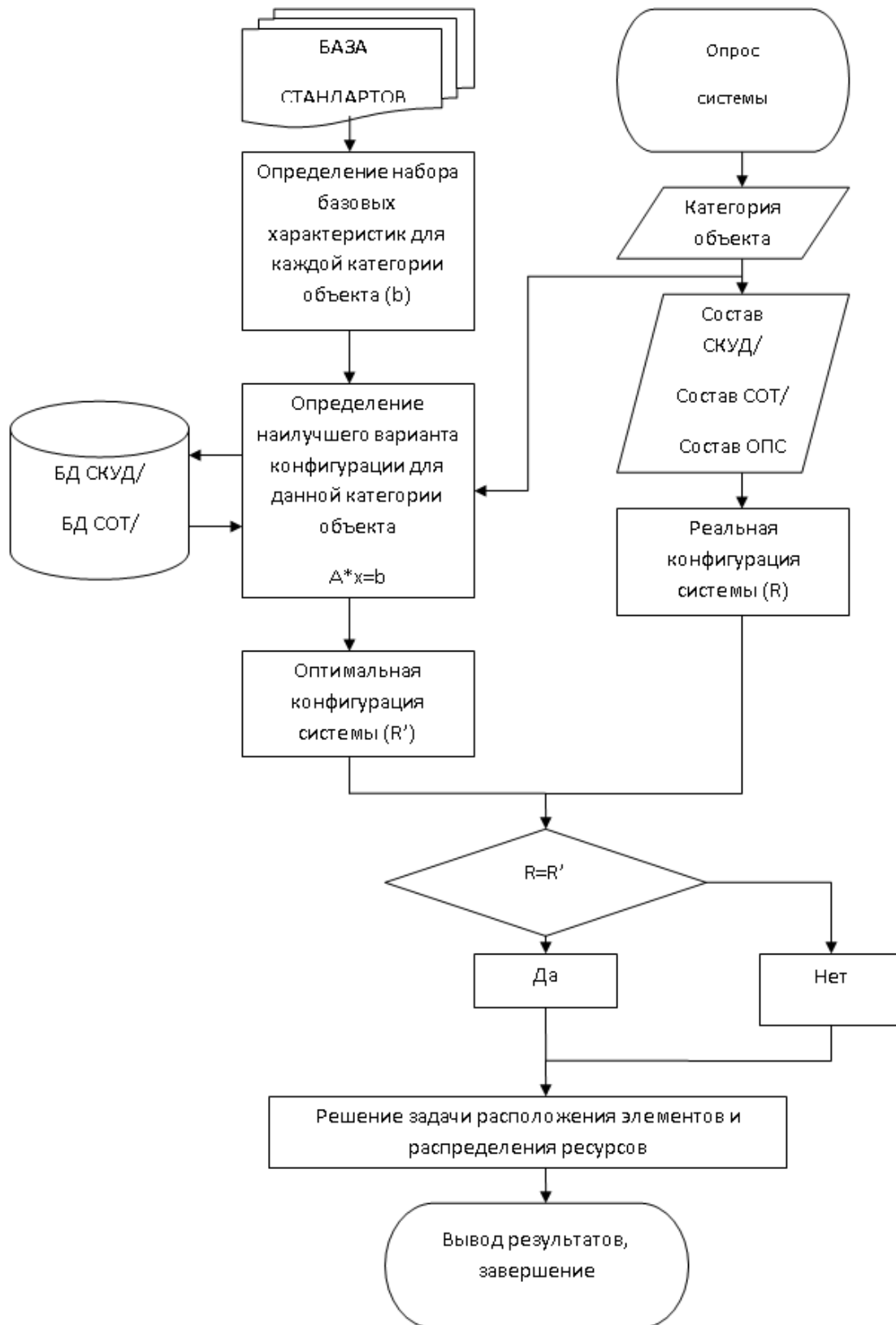


Рис. 1. Структурная схема работы системы принятия решений

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основным модулем СПР являются базы данных, для корректного проектирования которых разработана соответствующая инфологическая модель. Базовыми конструктивными элементами инфологических моделей являются сущности, связи между ними и их свойства. Сущностями в данном случае являются наборы техниче-

ских элементов СКУД, а свойствами (атрибутами) – их технические характеристики. Для каждой сущности необходимо определить ключ, который представляет собой минимальный набор атрибутов, по значениям которых можно однозначно найти требуемый экземпляр сущности. Далее формируются соответствующие таблицы баз данных, и составляется структура запроса, на основе которого во время работы автоматизированной системы создаются временные таблицы, необходимые для решения поставленных задач. Структурная схема рассматриваемой СПР представлена на рис. 1. Последовательность действий по принятию решений следующая:

1. С учетом рекомендаций технических стандартов производится определение минимальных требований для элементов системы. Каждое техническое решение заносится в специальную базу данных по категориям: СКУД, СОТ, ОПС. Под каждую конфигурацию подбираются конкретные решения.

2. Производится запрос на категорию и структуру объекта с учетом наличия зон различных типов объекта. Затем СПР позволяет выбирать оптимальную конфигурацию системы и производит распределение элементов на объекте.

3. Осуществляется анализ выбранной конфигурации СКУД на соответствие оптимальной.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения исследования были рассмотрены вопросы как проектирования новых систем безопасности, так и анализ уже существующих проектных решений. Анализ предметной области позволил сформулировать требования к системам безопасности, определить основные блоки алгоритма принятия решения по оптимальному размещению элементов СКУД.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты проектирования систем контроля и управления доступом на основе разработанных подходов будут отвечать необходимым критериям по значимости категории объекта с учетом стоимости проектируемой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. Ю. Комплексное применение методов дискретной оптимизации. М.: Наука, 1987.
2. Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман. Дж. Построение и анализ вычислительных алгоритмов. М.: Мир, 1979.
3. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
4. Панкратьев Е. В., Чеповский А. М. Алгоритмы и методы решения задач составления расписаний и других экстремальных задач на графах больших размерностей // *Фундаментальная и прикладная математика*. 2003. Т. 9, № 1. С. 235–251.
5. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента (планирование регрессионных экспериментов). М.: Наука, 1971. 312 с.
6. Балаш Э. Аддитивный алгоритм для решения задач линейного программирования с переменными, принимающими значения 0 или 1. // *Кибернетический сборник*. Новая серия. М.: Мир, 1969. Вып. 6. С. 217.
7. Бернер Л. И., Гармаш В. Б., Левин М. Ш., Антропов М. В. Формирование допустимых вариантов иерархической системы управления на стадии проектирования // *Проблемы и методы принятия решений: сб. тр.* М.: ВНИИСИ, 1985. С. 62–72.
8. Chen. B., Potts C. N., Woeginger G. J. A review of machine scheduling: Complexity, algorithms and approximability. *Handbook of Combinatorial Optimization*. Kluwer, 1998. Vol. 3.

УДК 620.179.621.313

О ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ УГРОЗ СИСТЕМАМИ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Б. Н. Епифанцев, С. А. Копейкин

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск, Россия

Аннотация – Существует два вида угроз безопасности магистральным трубопроводам, обусловленных террористической деятельностью: хищение перекачиваемого продукта и разрушение в результате диверсионных актов. Несмотря на значительные усилия, предпринимаемые по противодействию этим угрозам, вопрос об их нейтрализации по-прежнему стоит в повестке дня.

Цель статьи – обосновать подход к определению требуемого значения вероятности обнаружения несанкционированных попыток контактировать с оболочкой трубы для поддержания минимального уровня затрат на охрану трубопровода, оценить тенденцию их изменения в ближайшей перспективе и на основе этой информации предложить структуру системы физической защиты магистральных трубопроводов для нейтрализации террористических атак.

Сделан вывод о необходимости разработки мультисенсорной системы, минимальная комплектация которой должна включать взаимосвязанные сейсмическую и виброакустическую подсистемы.

Ключевые слова: магистральные трубопроводы, террористические угрозы, система физической защиты, надежность обнаружения, мультисенсорные системы, виброакустическая и сейсмоаналитическая подсистемы.

I. ВВЕДЕНИЕ

О наличии проблемных вопросов по обеспечению безопасности магистральных трубопроводов свидетельствуют данные статистики [1]. Наряду с традиционными причинами аварийных ситуаций: коррозия, природные факторы, ошибки персонала и др. существенную роль стали играть внешние воздействия на трубопровод. Под внешними воздействиями понимается деятельность третьих лиц (врезки в целях хищения перекачиваемого продукта, диверсионные акты, воздействие землеройной техники). По этой причине на нефтепроводах регистрируется 63 % аварий в России, 37% – в Западной Европе, 23 % – в США.

Не менее тревожная статистика отражает состояние аварийности по этой причине на газопроводах: 17 %, 50 %, 25 % соответственно.

С 2004 по 2008 годы доля аварий в России от несанкционированных врезок и диверсий составила 69,1 % [2]. Анализ публикаций по противодействию террористическим угрозам показал, что исследования в основном сконцентрированы на создании системы физической защиты магистральных трубопроводов, реализующей принцип: не допустить контакта злоумышленника с оболочкой трубы.

За прошедшие 4 года в базе данных Web of Science найдено более 80 публикаций по обеспечению безопасности в трубопроводном сегменте экономики, в Scopus – 55, в РИНЦ – 66. Значительная часть из них посвящена обнаружению несанкционированных работ в охранной зоне объекта мониторинга.

Формирование шурфа для доступа к трубопроводу может свидетельствовать о намерении создать врезку или установить боеприпас. Раскопки сопровождаются локальным возмущением сейсмического, виброакустического, оптического и теплового полей в охранной зоне, обнаружение которых призвано предотвратить возникновение чрезвычайной ситуации. Имеется ряд исследований по решению такой задачи.

В [5, 6] рассмотрена возможность использования тепловизионных систем для обнаружения утечек продукта и замаскированных мест раскопок. Передаточная характеристика тракта передачи виброакустических сигналов, сформированных в оболочке трубопровода, определяется рядом факторов, в том числе состоянием прилегающего к нему грунта. Данное обстоятельство используется для обнаружения утечек продукта и раскопок в зоне контролируемого объекта [7–9]. В отдельных случаях используются видеоаналитические системы, позволяющие проследить поведение субъекта (ов) в охранной зоне объекта мониторинга [10, 11].

Наибольший интерес проявляется к исследованию волоконно-оптического кабеля для выявления несанкционированных работ в охранной зоне трубопровода [12, 13]. Сейсмические колебания вызывают деформацию кабеля, их интенсивность в любом его месте определяется по отраженным от неоднородностей оптическим сигналам. Главной проблемой «волоконно-оптической» технологии в текущий период считается подавление сопутствующих шумов. Нестационарные флуктуации сейсмических полей снижают показатели по надежности обнаружения сигналов от объектов. Проблема получения приемлемых оценок по вероятностям идентификации видов событий при анализе регистрируемых с оптического волокна процессов обсуждена в [14]. В одной из последних работ по волоконно-оптическим системам мониторинга состояния нефтепроводов отмечается, что отсутствуют достоверные данные об их возможностях на протяженных (выше 10 км) объектах [15]. Приводятся результаты испытаний отечественной системы «Дунай»: механическая копка и движение тяжелой техники обнаруживаются на расстоянии 100 м от кабеля, перемещение грузового автомобиля – до 10 м, перемещение пешехода и ручная копка – непосредственно над кабелем. В [16] делается вывод о необходимости проведения НИОКР, а также разработки методики обработки данных с целью дальнейшего совершенствования данной технологии. Характерной чертой проведенных исследований является отсутствие описания с требуемой подробностью условий проведения экспериментов и получаемых оценок по вероятностям ошибок 1-го и 2-го рода, а также информации о работоспособности исследуемых систем при наличии искусственно создаваемых злоумышленниками помех. Нет обоснованных данных по надежности обнаружения вторжений лиц в охранную зону трубопровода и классификаций совершаемых ими действий. Директивные оценки вида «... минимальная наработка на ложное срабатывание ... не должна быть менее 170 час (1 неделя), хорошая помехоустойчивость характеризуется $T_{лс} \geq 720$ час (1 месяц)» [17] не имеют под собой серьезной доказательной базы.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В соответствии с системными законами процесс совершенствования технологии решения конкретной задачи вначале характеризуется наибольшей скоростью приращения ее параметров. Затем наступает замедление роста и резкое увеличение затрат на обеспечение незначительного прироста этих параметров. Имеет место эволюционный закон развития технологий, описываемый S-образной кривой.

Возможности усовершенствования методов обнаружения и распознавания образов подчиняются такой же закономерности. После достижения определенных значений вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода их дальнейшее незначительное снижение сопряжено со столь масштабным увеличением необходимых ресурсов, что теряется смысл в реализации этого намерения, необходимо использовать новый метод или комбинацию старого с новым.

На рис. 1 приведены графики, отражающие потери собственника объекта при его эксплуатации в зависимости от вероятности обнаружения террористических атак P_a . Чем меньше средств вкладывается в обеспечение безопасности созданной инфраструктуры, тем больших потерь следует ожидать при ее эксплуатации. Точка минимума суммарных потерь определяет требуемую вероятность обнаружения атак.

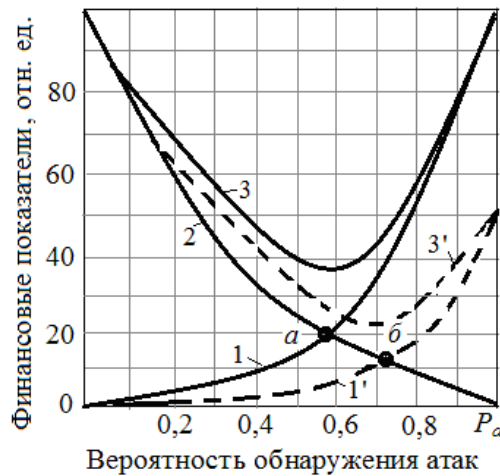


Рис. 1. Финансовые показатели противоборства сторон в зависимости от вероятности обнаружения атак P_a :
 1 (1') – расходы на защиту при использовании односенсорной (1) и мультисенсорной (1') систем,
 2 – ущерб от пропущенных атак, 3 (3') – суммарные потери собственника объекта при использовании односенсорной (3) и мультисенсорной (3') систем и объекта минимума суммарных потерь

Совершенствование односенсорных систем для повышения вероятности P_a на последней стадии «S-образного» развития связано с большими расходами. Есть пределы совершенствованию: противодействующая сторона изобретает новые приемы проведения атак. Данное обстоятельство стимулирует разработки мультисенсорных систем (кривые 1' и 3' на рис. 1 отражают их возможности по снижению расходов).

Собственнику объекта известны затраты на его защиту и потери от пропущенных атак. По ним можно оценить направление совершенствования системы противодействия для обеспечения оптимального значения P_a .

Ограничение описанного подхода – положение и форма представленных на рис. 1 кривых, отражающих расходные статьи, зависят от многих факторов, динамика их изменения превышает реальные возможности по модернизации систем противодействия угрозам. Необходимо располагать прогнозной информацией об интенсивности террористической деятельности и условиях ее проведения в ближайшей перспективе, чтобы учитывать эти данные при разработке технологий рассматриваемого назначения. Подход для получения такой информации развивается в настоящей статье.

III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Обобщенную модель, позволяющую решить поставленную задачу, можно представить в виде

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = \left[f_1 \left(\frac{ВВП}{P} \right) - f_2 \left(\frac{НЗ_{90}}{НЗ_t} \right) - \frac{\alpha_1 \beta_1}{\alpha_2 \beta_2} \cdot \gamma N_2 \right] \cdot N_1(t); \\ \frac{dN_2}{dt} = \left[f_3 \left(\frac{ЗТ}{П} \right) - f_4 \left(\frac{ЗП}{Д} \right) + \frac{\alpha_2 \beta_2}{\alpha_1 \beta_1} \cdot \gamma N_1 \right] \cdot N_2(t), \end{cases} \quad (1)$$

где N_1 – число нападений на защищаемый объект; ВВП – валовой внутренний продукт на душу населения в прошедшем году; D/P – отношение среднего дохода от проведенной операции к расходу на ее проведение; H_{30}/H_3 – отношение нравственного здоровья населения страны (региона) соответственно в 90-й и текущий годы; α_1, β_1 – соответственно уровень квалификации и технической оснащенности нападающей стороны; α_2, β_2 – соответственно уровень квалификации и технической оснащенности защитников; ЗП – зарплата защитников; γ – коэффициент взаимодействия защитников и нападающих, находящиеся в обратной зависимости от размера/протяженности/ площади защищаемого объекта; N_2 – численность защитников объекта; ЗТ – затраты на защиту объекта, П – суммарные потери от нападений на защищаемый объект.

ВВП характеризует бедность общества, функция $f_1(\text{ВВП} = \text{const}, D/P)$ – долю населения, готовую пойти на правонарушение в зависимости от ожидаемого дохода и имеющего достаточный уровень знаний для совершения преступления в рассматриваемой сфере деятельности. Очевидно, при $(D/P) \leq 1$ значение функции $f_1(\text{ВВП} = \text{const}, D/P) = 1$ (нет смысла в проведении операции, не получив какой-либо прибыли; фактор «мести» во внимание не принимается). Кривая $f_1(\text{ВВП} = \text{const}, D/P)$ имеет область насыщения, когда исчерпывается ресурс членов общества, способных совершить правонарушение заданного вида. Для сообществ, характеризующихся разным соотношением ограничивающих факторов, форма кривой сохраняется, изменяются ее коэффициенты:

$$f_1(\text{ВВП} = \text{const}, D/P) = a_1 / (1 + b_1 \exp(-c_1 D/P)),$$

где a_1 – коэффициент, определяющий часть общества, потенциально готовая перейти в стан правонарушителей из корыстных интересов. Коэффициенты a_1, b_1, c_1 определяются экспертными технологиями с учетом полученного в предшествующем году ВВП.

Функция $f_2(H_{30}/H_3) = (H_{30}/H_3) f_1(D/P)$ характеризует законопослушность населения, его культурный уровень и законодательную базу по борьбе с соответствующим видом преступлений. H_3 выступает в роли интегрального показателя, оцениваемого по данным государственной статистики (по показателям, характеризующим социальное напряжение в обществе). Функции f_3, f_4 являются частными случаями логистических кривых.

Очевидно, что затраты на защиту объекта ЗТ будут тем больше, чем больше N_2 . Суммарные потери от атак П увеличиваются с ростом числа нападений, т.е. с ростом N_1 . Один из возможных вариантов функции $f_3(\text{ЗТ}, \text{П}, N_1, N_2)$, учитывающий ее логистический характер:

$$f_3 = a_3 \exp\left(\frac{\text{П} N_1}{\text{ЗТ} \cdot N_2} b_3 - c_3\right) / \left(1 + \exp\left(\frac{\text{П} N_1}{\text{ЗТ} \cdot N_2} b_3 - c_3\right)\right),$$

где a_3, b_3, c_3 – коэффициенты формы кривой.

По регистрируемому $dN_1(t)/dt$, текущим расходам на защиту объекта и потерям от нападений на него, значению D/P , определяемому по опросу населения прилегающих к объекту территорий, и отслеживаемому отношению H_{30}/H_3 , дается оценка состояния защиты и отличие ее от оптимальной (равенство расходов на защиту и потерь от атак на объект). По этой оценке определяются требования к вероятностям обнаружения атак и ложной тревоги, которые должна обеспечивать служба безопасности объекта.

Частный случай, вытекающий из модели (1) и отражающий взаимодействие в системе «террорист – система защиты магистрального продуктопровода – полиция», можно представить в виде системы четырех уравнений [18]:

$$\begin{cases} \frac{dN_{\Pi}}{dt} = r_{\Pi 0} \left(1 - \frac{N_{\Pi}}{N_{\Pi 0} N_{\Pi \max}}\right) N_{\Pi} - a_{\Pi} P_a m_{\Pi} P_M N_{\Pi} N_M + r_{\Pi 2}; \\ \frac{dN_B}{dt} = a_{\Pi} \left(\frac{N_{\Pi}}{g_{\Pi}} - N_{\Pi}\right) - \frac{N_{\Pi}}{g_{\Pi}} P_a a_{\Pi}; \\ \frac{dN_3}{dt} = r_{S0} \left(\frac{D_B(-t_S)}{b_B D_0}\right)^{k_{S1}} - r_{S1} \left(\frac{D_S}{b_S D_B(-t_S)}\right)^{k_{S2}}; \\ \frac{dN_M}{dt} = \frac{N_{\Pi}(-t_M)}{g_{\Pi}} P_B(-t_M) a_{\Pi} r_{M0} - r_{M1} N_M + r_{M2} N_{\Pi}, \end{cases} \quad (2)$$

где $N_{\Pi}(t)$ – количество терактов в момент времени t ; N_B – количество атак на объект; N_3 – число элементов защиты трубопровода; N_M – численность сотрудников полиции, привлеченных к расследованию преступной деятельности на магистральных трубопроводах; $r_{\Pi 0}$ – коэффициент распространения информации между членами социума («вирусный» фактор) [19]; $N_{\Pi m}$ – емкость среды, в которой будет распространяться «идея хищения

продукта» [20]; α_{II} – среднее число выходов группы террористов на объект атаки в единицу времени; P_a – вероятность обнаружения атаки; m_{II} – вероятность задержания террористов; P_M – вероятность вынесения обвинительного приговора задержанным террористом; r_{II2} – коэффициент прироста числа приверженцев идеи хищения продукта; g_{II} – средний размер группы террористов; r_{S0}, r_{S1} – коэффициенты прироста и снижения затрат на защиту объекта; k_{S0}, k_{S1} – коэффициенты стратегии защиты, определяющие предельные значения вероятностей пропуска атак и ложных решений используемой системы защиты объекта; D_B – потери от атаки в момент времени t_S ; D_S – расходы на защиту объекта; b_B – потери доли доходов от эксплуатации объекта в результате атаки; b_S – отношение потерь от атак к затратам на защиту объекта; t_M – время задержки реагирования структур полиции на зарегистрированную атаку; r_{M0}, r_{M1} – соответственно коэффициент прироста и сокращения числа сотрудников полиции, привлеченных к расследованию фактов атак на защищаемый объект; r_{M2} – коэффициент прироста сотрудников полиции при изменении активности в сбыте похищенного продукта.

IV. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Адекватность модели (2) проверена сопоставлением результатов моделирования процесса «врезного терроризма» в Самарской области с реальными данными, представленными в опубликованных материалах за период с 2000 г. по 2010 г. (рис. 2).

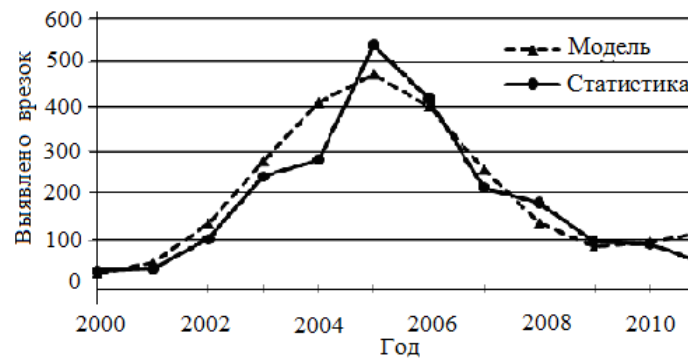


Рис. 2. Результаты моделирования и статистические данные по числу обнаруженных врезок

Долгосрочные прогнозы, основанные на применении рассматриваемой модели, предсказывают новый цикл значительного роста террористических атак на магистральные трубопроводы с последующим спадом к концу третьего десятилетия (рис. 3).

Информация о фактических затратах на защиту и о размерах потерь от врезок носит закрытый характер. Поэтому данные на рис. 3 отражают тенденции расходов на защиту и ущерб от хищений продукта при условно взятых цифрах в начальный момент времени (2000 г.). Другие показатели модели соответствуют найденным по Самарской области на тот же момент времени.

Модель (2) позволяет оценить требуемое значение вероятности обнаружения атак P_a .

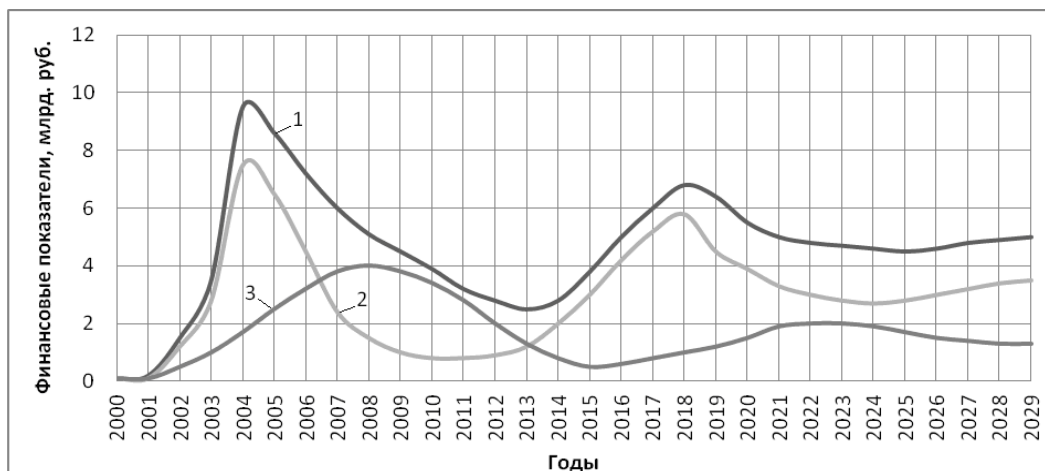


Рис. 3. Прогноз финансовых показателей противоборства сторон до 2029 года при сохранении текущего уровня вероятности обнаружения атак системами защиты: 1 – годовые суммарные затраты, млрд руб., 2 – годовые расходы на защиту, млрд руб.

V. ВЫВОДЫ

В 2013 г. наблюдался наиболее благоприятный момент в организации защиты трубопроводного транспорта. Начиная с этого момента следовало бы увеличить расходы на защиту объектов, чтобы предотвратить рост суммарных затрат в ближайшей перспективе.

Эффективность предложенного подхода по определению требований к системам защиты объектов от террористических угроз продемонстрирована на примере Самарской области. Выбор региона определился наличием опубликованных данных на сравнительно протяженном периоде времени, необходимых для постановки вычислительного эксперимента. Представляет интерес получать прогнозные оценки в этом сегменте экономики для страны в целом.

Наличие такой информации позволит сформировать политику по обнаружению террористических атак и определиться с требованиями к системе физической защиты, которые необходимо обеспечить в текущий период и в ближайшей перспективе.

На сегодняшний день не просматривается возможность эффективного противодействия подготовленным нарушителям по достижению поставленных ими целей с помощью любых из известных односенсорных систем. Следует определиться с составом многосенсорных систем. Комбинация виброакустической и сейсмоаналитической подсистем позволяет компенсировать наиболее значимые недостатки каждой из них.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Омской области и РФФИ № 15-48-04172

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисанов М. В. [и др.]. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта // Безопасность труда в промышленности. 2010. № 7. С. 16–22.
2. Плюхина Е. Е. Метод обнаружения несанкционированных врезок и диверсий на трубопроводах // Вестник ОГУ. 2011. № 16 (135). С. 92–94.
3. Орлов Д. Врезать по врезкам // Трубопроводный транспорт. 2013. № 2. С. 12–15.
4. Гурдин К. Похитители нефти // Аргументы недели. 2012. № 2 (294). С. 5.
5. Geoplace – GEOEurope – Aerial imaging applications in pipeline industry. URL: www.geoplace.com/ge/20016070160701pip.asp.
6. Епифанцев Б. Н. Дистанционная диагностика подземных трубопроводов по тепловому излучению // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 28–39.
7. Ozevin Didem, Harding James. Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012. Vol. 92. P. 63–69.
8. Epifansev B. N. An Acoustic Method for Diagnostics of the State of Underground Pipelines: New Possibilities // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. Vol. 50, no. 5. P. 254–257.
9. Epifantsev B. N., Pyatkov A. A., Fedotov A. A. Evaluation of the Sensitivity of a Vibroacoustic Detection System for Local Disturbances of Trunk Pipeline Environmental Parameters // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Vol. 51, no. 2. P. 70–78.
10. Dollar P. [et al.]. Pedestrian Detection: An Evaluation of the State of the Art // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012. Vol. 34, no. 4. P. 743–761.
11. Епифанцев Б. Н., Пятков А. А., Копейкин С. А. Мультисенсорные системы мониторинга территорий ограниченного доступа: возможность видеоаналитического канала обнаружения вторжений // Компьютерная оптика. 2016. № 1. С. 121–129.
12. Klar A., Linker R. Fiber optic sensing optical fibers detect tunnel-digging // Laser Focus World: Lasers, Photonics, Optics News & Technology Advances, 2009. URL: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-45/issue-4/world-news/fiber-optic-sensing-optical-fibers-detect-tunnel-digging.html>.
13. Duckworth G., Ku E. OptaSense (R) distributed acoustic and Seismic sensing using COTS fiber optic cables for Infrastructure Protection and Counter Terrorism // Sensors and command, control, communications and intelligence (c3i) Technologies for homeland security and homeland deference XII. 2013. Vol. 8711. UNSP87110G.
14. Wang, J. FBG Intrusion Recognition Algorithm Based on SVM // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 591–593. P. 1422–1427.
15. Нестеров Е. Т., Марченко К. В., Трещиков В. Н., Леонов А. В. Волоконно-оптическая система мониторинга протяженных объектов (нефтепроводов) на основе когерентного рефлектометра // Т-Comm. 2014. № 1. С. 25–28.

16. Шеховцев А. В., Мансуров М. Н., Голубин С. И. Экспериментальные исследования волоконно-оптического метода обнаружения утечек из нефтепроводов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2015. № 6 (52). С. 30–35.
17. Звездинский С. С. Проблема выбора периметровых средств обнаружения // Специальная Техника. 2002. № 4. С. 36–41.
18. Епифанцев Б. Н., Пятков А. А. Предупреждение чрезвычайных ситуаций на магистральных продуктопроводах. Ч. 1. Обнаружение несанкционированных вторжений в охранную зону продуктопровода. Омск: СиБАДИ, 2013. 122 с.
19. Bass F. M. A new product growth for model consumer durables // Management Science. 1969. P. 215–227.
20. Becker G. S. Crime and Punishment: An Economic Approach // The Journal of Political Economy. 1968. Vol. 76, no. 2. P. 169–217.

УДК 629.113

О СКРЫТОМ ОБНАРУЖЕНИИ АЛКОГОЛЬНОГО ОПЬЯНЕНИЯ ВОДИТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ

Б. Н. Епифанцев¹, С. С. Жумажанова², А. А. Нигрей³

¹Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск, Россия

²Общество с ограниченной ответственностью «Инновационные ВЕБ-технологии», г. Омск, Россия

³Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Аннотация – Проведен анализ идентификационного потенциала вариабельности сердечного ритма при идентификации психофизиологического состояния субъекта, а также приведены результаты экспериментов по обнаружению наличия алкоголя в крови субъекта по изображению его лица. Сделан вывод о возможности использования малогабаритных видеокамер для скрытого получения информации при принятии решения о потреблении алкоголя водителем.

Ключевые слова: изображение лица, вариабельность сердечного ритма, асимметрия лица, изменения температурных особенностей, алкогольное опьянение.

1. ВВЕДЕНИЕ

По данным статистики за 2015 год в России произошло около 184 000 дорожно-транспортных происшествий (ДТП), из них по вине нетрезвых водителей – 16 000 [1]. При содержании 0,05 промилле алкоголя в крови вероятность ДТП повышается в 5 раз, при 1 промилле – в 25 раз [2].

В ряде европейских стран и США в целях недопущения к управлению транспортным средством водителя в состоянии алкогольного опьянения активно используется техническое средство – алкозамок, осуществляющее блокировку включения системы зажигания автомобиля при превышении содержания алкоголя в крови установленного уровня. Алкозамок снабжен сменным мундштуком и служит для измерения концентрации искомого вещества в выдыхаемом воздухе [3].

Основной недостаток существующих методов обнаружения субъектов, употребивших алкоголь: человек знает, что его проверяют, возможна подмена и фальсификация результатов теста, отсутствие контроля в процессе управления транспортным средством. Разработка способа скрытой от водителя оценки степени его опьянения относится к категории актуальных задач.

В работе [4] предложен и исследован способ бесконтактного автоматизированного измерения частоты сердцебиения по видеоизображениям лица пациента, нечувствительный к его движениям и изменениям освещенности сцены. В [5] компактная web-камера используется для получения нескольких физиологических параметров: частоты дыхания, сердцебиения и вариабельности сердечного ритма. В работе [6] авторы сравнили данные фотоплетизмограммы, полученные с помощью цифровой камеры, расположенной на расстоянии трех метров от субъекта, и контактных датчиков, закрепленных на пальцах. Полученные неконтактным способом данные имеют высокий коэффициент корреляции (0,94) с показателями, полученными традиционным методом.

Малые габариты web-камер позволяют реализовать скрытое наблюдение за водителем в процессе управления транспортным средством. Получены обнадеживающие данные по распознаванию намерений субъекта с использованием изображений [7]. В [8] приведена вероятность правильного распознавания стрессовых состояний человека (0,9) по инфракрасному изображению его лица. Перечень позитивных результатов подобного сор-

та можно продолжать еще долго. Есть основание считать, что видеоизображение лица человека содержит достаточно информации для решения задачи по обнаружению наличия в крови алкоголя.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сложилась точка зрения, что информативным показателем физиологического состояния организма является вариабельность сердечного ритма (ВСР) [9–11]. Согласно проведенным исследованиям при содержании в крови алкоголя (ВАС) на уровне 0,5‰ (промилле) наблюдаются статистически значимые изменения параметров ВСР, диапазон 0,6–1,5‰ характеризуется легкой степенью опьянения. Чтобы ввести испытуемого в соответствующее состояние, следует воспользоваться формулой М. Видмарка: $C = A / m r$, где C – уровень концентрации алкоголя в крови (промилле), A – масса выпитого напитка в граммах, m – масса тела испытуемого в кг, r – коэффициент Видмарка (0,7 – для мужчин, 0,6 – для женщин). Данные таблицы, полученные нами в процессе проводимых исследований, иллюстрируют влияние алкоголя на параметры ВСР.

ТАБЛИЦА

ПОКАЗАТЕЛИ ВСР В АДЕКВАТНОМ СОСТОЯНИИ И ПОСЛЕ ПРИНЯТИЯ АЛКОГОЛЯ

№ испытуемого	Масса тела, кг	Состояние испытуемого				
		Адекватное		После принятия алкоголя		
		M_{NN} , мс	$SDNN$, мс	ВАС, ‰	M_{NN} , мс	$SDNN$, мс
1	70	709,3	10,7	0,65	626,4	23,5
2	67	810,2	15,4	0,67	731,1	36,0
3	68	670,0	23,4	0,66	599,5	32,8
4	70	859,7	21,4	0,65	793,8	34,7
5	75	943,7	35,9	0,60	906,7	71,2

Параметр M_{NN} – средний интервал ВСР, $SDNN$ – среднеквадратическое отклонение $R-R$ интервалов кардиограммы.

Для оценки вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода по обнаружению факта принятия алкоголя в количестве, обеспечивающим ВАС $\in 0,5-0,7\%$, разработан алгоритм, реализующий следующие операции:

- разложение последовательности кардиоинтервалов в ряд Фурье;
- усреднение мощностей спектральных составляющих в каждом из 25 диапазонов спектра;
- формирование эталонов: «адекватное состояние», «состояние после употребления алкоголя»;
- вычислительный эксперимент по обнаружению у испытуемых алкоголя в крови, реализующий формулу гипотез Байеса [12].

IV. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

По результатам эксперимента получена следующая оценка: вероятность ошибочного решения (сумма вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода) лиц в адекватном состоянии и через 10 минут после принятия 100 мл алкоголя составила 0,026. Достоверность оценки – 0,9 при доверительном интервале 0,014.

Вопрос о приемлемости полученной оценки для решения практических задач является дискуссионным. Существует ли возможность ее уменьшения, располагая информацией о видеоизображении лица?

В рамках исследований по изучению идентификационного потенциала асимметрии лица человека [13] получены плотности распределения коэффициента симметрии человеческих лиц в адекватном состоянии и состоянии после употребления алкоголя. Наблюдается уменьшение подобия левой и правой сторон лица (пример на рис. 1), дополнение информации об этом показателе позволяет положительно ответить на поставленный вопрос.

Значительные возможности открываются при использовании тепловых изображений.

Сравниваются соответствующие друг другу пиксели двух кадров. Если отличие в цвете между ними больше заданного значения, принимаем, что температура этой области изменилась. Области, на которых нет такого изменения, закрашиваются в черный цвет. Алгоритм выделяет движения лица. Поэтому для каждого пикселя первого кадра исследуется область вокруг соответствующего ему пикселя на втором кадре. Если найден пиксель с похожими цветовыми характеристиками, считается, что «срабатывание» алгоритма ложное, и этот пиксель будет закрасен в черный цвет. Такое преобразование дает наглядное представление о наиболее интенсивно меняющихся областях температур на лице. Площадь всех незакрашенных пикселей на изображении харак-

теризует масштаб произошедших изменений. Рис. 2 иллюстрирует возможность по обнаружению употребления водителем алкоголя.

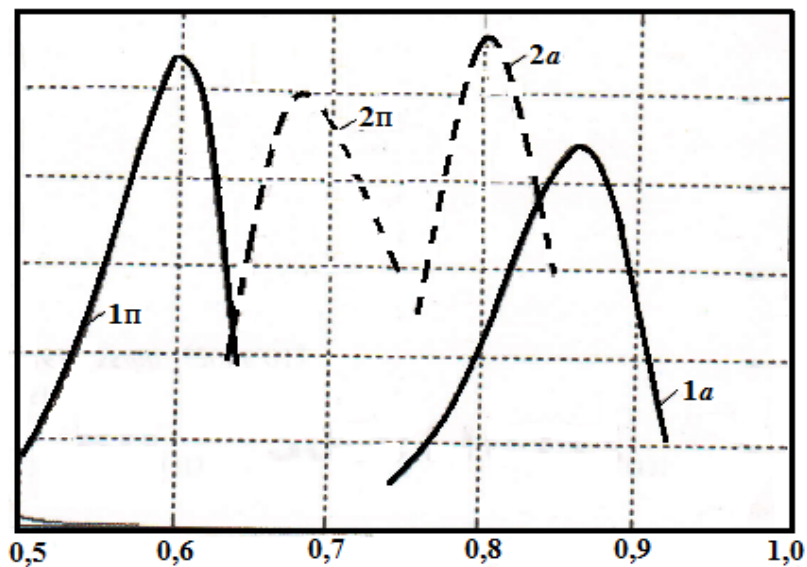
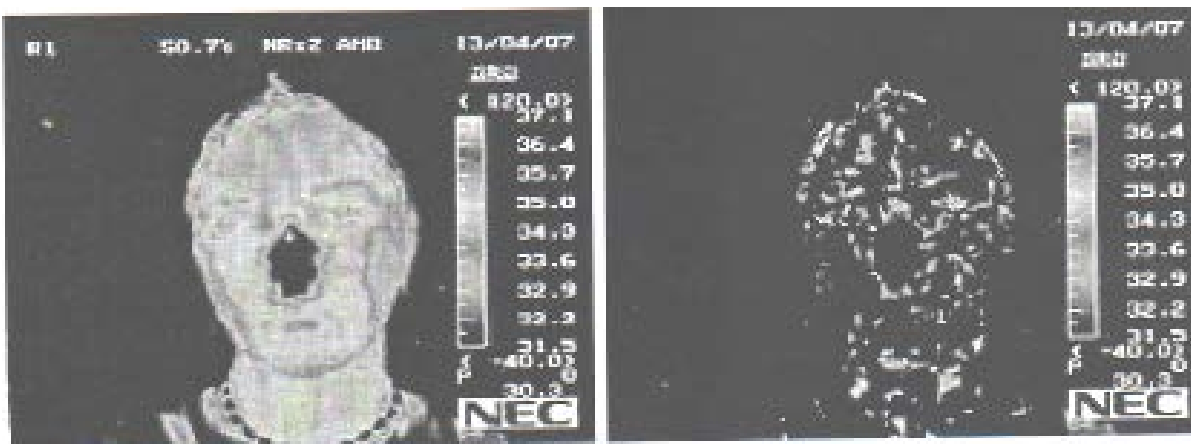


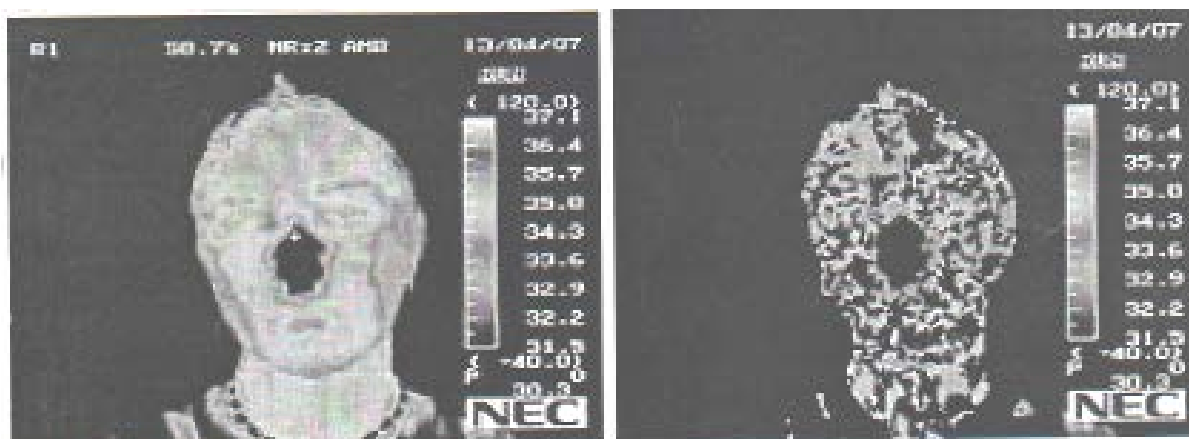
Рис. 1. Коэффициент симметрии лица первого (1а,1п) и второго (2а,2п) субъектов, находящихся в адекватном состоянии (1а,2а) и после употребления алкоголя (1п,2п)



a)



б)



б)

Рис. 2. Фрагменты исходных тепловых и преобразованных изображений:
 а) – субъект в адекватном состоянии, б) – субъект возбужден
 (после неоднократных вдыханий нашатырного спирта), в) – субъект употреблял алкоголь

V. ВЫВОДЫ

Таким образом, современные возможности получения информации о психофизиологическом состоянии субъекта позволяют реализовать технологию скрытого обнаружения алкогольного опьянения водителя в процессе управления транспортным средством на приемлемом уровне ошибочных решений.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ по заданию № 212/2016 на 2016 год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистика ДТП в России за январь-декабрь 2015 года. URL: <http://www.1gai.ru/516270-statistika-dtp-v-rossii-za-yanvar-dekabr-2015-goda.html> (дата обращения: 25.05.2016).
2. Влияние алкоголя на водителя. URL: <http://www.autodealer.ru/autopedia/charges/alcohol> (дата обращения: 06.05.12).
3. Предрейсовый контроль. URL: <http://www.alcotest.ru/reg/alcoin.html> (дата обращения: 06.05.12).
4. Poh M. Z. [et al.]. Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation // Optical Society America/ 2010. Vol. 18, no. 10. P. 10762–10774.
5. Poh M.-Z., McDuff D. J., Picard R. W. Advancements in Noncontact, Multiparameter Physiological Measurements Using a Webcam // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2011. Vol. 58, no. 1. P. 7–11.
6. McDuff D., Gontarek S., Picard R. W. Remote detection of photoplethysmographic systolic and diastolic peaks using a digital camera // IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering. 2014. Vol. 61, no. 12. P. 2948–2954.
7. Jain U. [et al.]. Concealed knowledge identification using facial thermal imaging // ICASSP IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-Proceedings, 2012. March 25-30. Art. no. 6288219. P. 1677–1680.
8. Cross C. B. [et al.]. Thermal imaging to detect physiological indicators of stress in humans // Conference: SPIE Defense, Security, and Sensing. Thermal Infrared Applications XXXV, April 30–May 01, 2013. Vol. 8705. Art. no. 870501 DOI: 10.1117/12.2018107.
9. Mascord D. J. [et al.]. Behavioral and physiological indices of fatigue in a visual tracking task // Journal of Safety Research. 1992. Vol. 23. P. 19–25.
10. Епифанцев Б. Н., Ковальчук А. С. Скрытая идентификация водителя и его психофизиологического состояния в процессе управления транспортным средством по вариабельности сердечного ритма // Биотехносфера. 2014. № 5 (35). С. 55–59.
11. Епифанцев Б. Н., Архипов А. А. Об эффективности признака асимметрии изображения лица в задачах идентификации оператора человеко-машинных систем // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 4. С. 21–25.
12. Епифанцев Б. Н. [и др.]. Сравнение алгоритмов комплексирования признаков в задачах распознавания образов // Вопросы защиты информации. 2012. № 1. С. 60–66.
13. Епифанцев Б. Н., Архипов А. А. Об информативности признака асимметрии лица в задачах распознавания операторов эргатических систем // Автометрия. 2015. 51. № 4. С. 31–39.

ОБ АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ
К ИЗМЕНЕНИЯМ ФОРМЫ ОБНАРУЖИВАЕМЫХ СИГНАЛОВ

Б. Н. Епифанцев¹, В. А. Комаров²

¹Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск, Россия

²Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Аннотация – В условиях низкого отношения сигнал/шум отклонение формы обнаруживаемых сигналов приводит к их пропуску. Задача по нейтрализации этого эффекта отнесена к категории актуальных. В активных системах контроля предлагается решить ее через введение операции отслеживания результата сравнения реакций контролируемого и эталонного объектов на зондирующие воздействия. По степени сходства с возможными вариантами результатов сравнения выбирается наиболее вероятный из них. Получены оценки вероятности пропуска сигнала в зависимости от отклонения его формы от заложенной в алгоритм оптимального обнаружения. Проведен вычислительный эксперимент по получению зависимостей коэффициентов корреляции от числа накоплений регистрируемых сигналов для разных их форм. Полученные результаты – основа для построения активных систем контроля, адаптированных к изменениям формы обнаруживаемых сигналов

Ключевые слова: система активного контроля, обнаружение сигналов, изменение формы сигнала, алгоритм адаптации системы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Потребность обнаружения (классификации) незначительных отклонений показателей контролируемого объекта от заданных стимулировала исследования по разработке алгоритмов, пригодных для использования в условиях низкого отношения сигнал/шум (ОСШ) и нестационарных шумов. В течение 2011–2015 гг. в рамках этого направления только по диагностике состояния магистральных трубопроводов интенсивность публикаций составляла от 6 до 17 статей в год по базе Web of Science, от 12 до 17 по базе Scopus, от 10 до 17 по базе РИНЦ. Основное направление исследований – адаптация оптимальных технологий обнаружения (распознавания) сигналов к решению конкретных задач. Однако сохраняется неопределенность в выборе способов использования этих технологий при рассмотрении активных способов контроля.

При $ОСШ \leq 1$ алгоритмы оптимальной фильтрации не обеспечивают приемлемых для практики результатов в режиме однократного приема [1]. Одна из причин снижения их эффективности – форма полезного сигнала претерпевает отклонения от ожидаемой, флуктуируя около нее по случайному закону. Поэтому результаты фильтрации оказываются зависимы от времени проведения контроля. Многочисленные примеры, отражающие описанную ситуацию, приведены в [2]. В частности, в радиосейсмическом методе обнаружения подповерхностных неоднородностей исследуемая территория «прозванивается» сейсмическими сигналами (подповерхностными волнами Релея и Лява) [3]. Коэффициент поглощения этих волн (в дБ/см) при их распространении пропорционален корню квадратному от частоты. В зависимости от расстояния до объекта форма сигнала меняется, изменяется и отклик. Многочисленные примеры подобного вида можно встретить в задачах теплового контроля.

Значительное количество технологий контроля допускает неоднократную проверку качества (состояния) исследуемого объекта. Данное обстоятельство позволяет реализовать не только потенциал оптимальных технологий обнаружения сигналов, но и существенно снизить вероятности ошибок 1-го и 2-го рода за счет дополнительного введения операции накопления (рециркуляции по терминологии в [1]). В данной статье анализируется такая возможность в части формирования эталонного сигнала (образа по терминологии в [4]) при изменении формы детектируемых откликов испытуемых объектов при проведении активного контроля.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Система активного контроля в подавляющем количестве случаев включает в себя источник воздействия на эталонный и контролируемый объекты и схему сравнения возникающих при этом откликов. В распространенном варианте этой схемы реализуется операция вычитания [5,6]. При отклонении параметров объекта контроля от нормативно установленных на ее выходе формируется сигнал $\Delta C(t - T_k) + \Delta \zeta(t)$, характеризующий это отклонение, и разность сопутствующих шумов в сравниваемых каналах $\Delta \zeta(t)$, T_k – период повторного воздействия. Обнаружение откликов $\Delta C(t - T_k)$ реализуется с использованием «корреляционных фильтров» [4].

Если длительность (размер) откликов $\Delta C(t - T_k)$ известна (задается источником воздействий), то их форма с течением времени изменяется. В какой мере данное обстоятельство отразится на параметрах обнаружения? Получить ответ на этот вопрос – цель настоящей статьи.

III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В [7] в качестве математической модели дефекта «пора» предложено использовать цилиндрический сигнал (вероятность обнаружения такого сигнала зрительной системой и компьютерным зрением получена в [8]).

$$\Delta C(r) = \Delta C_0, \text{ если } r \leq r_c, \text{ и } 0 \text{ при } r > r_c, \quad (1)$$

где ΔC_0 – амплитуда сигнала, r_c – его радиус.

Пространственный спектр (1)

$$B(\omega_r) = 2\pi\Delta C_0 r_c^2 \cdot J_1(\omega_r \cdot r_c) / \omega_r \cdot r_c, \quad (2)$$

где J_1 – функция Бесселя, ω_r – пространственная частота.

Флуктуации изотропного однородного фона описываются спектральной плотностью, классифицируемой по скорости снижения мощности с увеличением частоты:

$$\text{– равномерной } G(\omega_r) = 2\pi r_\phi^2 \sigma_\phi^2; \quad (3)$$

$$\text{– медленно спадающей } G(\omega_r) = 2\pi r_\phi^2 \sigma_\phi^2 (1 + \sqrt{\omega_r \cdot r_\phi})^{-1}; \quad (4)$$

$$\text{– линейно спадающей } G(\omega_r) = 2\pi r_\phi^2 \sigma_\phi^2 (1 + \sqrt{(\omega_r \cdot r_\phi)^{1,8}})^{-1} \quad (5)$$

и др., σ_ϕ – среднеквадратическое отклонений флуктуаций фона, r_ϕ – радиус корреляции фона.

Для оптимального обнаружения (1) на фоне (3) частотная характеристика фильтра должна иметь вид

$$H(\omega_r) = (B(\omega_r) \cdot G^{-1}(\omega_r) \cdot \exp[-j(\omega_x x_0 - \omega_y y_0)]).$$

Если координаты сигнала $x_0 = y_0 = 0$, то

$$H(\omega_r) = \frac{\Delta C_0}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi} \cdot \frac{J_1(\omega_r \cdot r_c)}{\omega_r \cdot r_c}, \quad K_\phi = r_\phi / r_c,$$

K_ϕ – относительный радиус корреляции флуктуаций фона.

Отношение сигнал/помеха на выходе фильтра

$$q_3 = \frac{1}{2T} \int_0^\infty \frac{B(\omega_r)}{G(\omega_r)} \cdot \omega_r d\omega_r = \frac{1}{2} \frac{\Delta C_0^2}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi^2}. \quad (6)$$

При нахождении выражения для q_3 , а также приведенных ниже q_4 и q_5 , использовались табличные интегралы в [9].

В свою очередь, для фона (4)

$$\begin{aligned} q_4 &= \frac{\Delta C_0^2}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi^2} \left[\int_0^\infty \omega_r^{-1} I_1^2(\omega_r \cdot r_c) d\omega_r + \int_0^\infty \sqrt{r_\phi} \cdot \omega_r^{-0,5} I_1^2(\omega_r \cdot r_c) d\omega_r \right] = \\ &= \frac{\Delta C_0^2}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi^2} (0,5 + 0,82\sqrt{K_\phi}), \end{aligned}$$

для фона (5)

$$q_5 = \frac{\Delta C_0^2}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi^2} \left(0,5 + \int_0^\infty \sqrt{r_\phi^{1,8}} \cdot \omega_r^{-0,1} I_1^2(\omega_r \cdot r_c) d\omega_r \right) = \frac{\Delta C_0^2}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi^2} (0,5 + 3,386K_\phi^{0,9}).$$

Полученные формулы отражают известное положение о влиянии отношения размеров объекта к размерам интервалов корреляции флуктуаций фона по осям координат. Данное положение остается справедливым и для зрительной системы человека [8].

Для модели сигнала вида симметричной гауссоиды

$$B(\omega_r) = \Delta C_0 \cdot \pi r_c^2 \cdot \exp(-\omega_r^2 \cdot r_c^2 / 4)$$

при наличии помех вида (3) частотная характеристика оптимального фильтра будет иметь вид

$$H(\omega_r) = \frac{1}{2} \frac{\Delta C_0}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi^2} \cdot \exp(-\omega_r^2 \cdot r_c^2 / 4),$$

а отношение сигнал/помеха $q_3 = \frac{1}{4} \frac{\Delta C_0^2}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi^2}$,

r_c – условный радиус, в пределах которого амплитуда сигнала превышает $e^{-1} \Delta C_0$.

Если обнаружение полезного сигнала ведется на фоне помех вида (4), то

$$q_4 = \frac{1}{4} \frac{\Delta C_0^2}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{r_0^2}{K_\phi^2} \left[\int_0^\infty \omega_r \exp\left(-\frac{\omega_r^2 r_c^2}{2} d\omega_r\right) + \sqrt{r_\phi} \int_0^\infty \omega_r^{1,5} \exp\left(-\frac{\omega_r^2 r_c^2}{2}\right) d\omega_r \right].$$

Приведенные интегралы являются табличными (см. [9]), и окончательное выражение для отношения сигнал/помеха будет иметь вид

$$q_4 = \frac{1}{4} \frac{\Delta C_0^2}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi^2} (1 + 1,077 \sqrt{K_\phi}).$$

При наличии помех вида (5)

$$q_5 = \frac{1}{4} \frac{\Delta C_0^2}{\sigma_\phi^2} \cdot \frac{1}{K_\phi^2} (1 + 1,209 K_\phi^{0,9}).$$

По сравнению с «цилиндрическим» сигналом ОСП меньше:

- для помех вида (3) в два раза;
- для помех вида (4) в $2(1 + 1,64 \sqrt{K_\phi}) / (1 + 1,07 \sqrt{K_\phi})$ раз;
- для помех вида (5) в $2(1 + 6,772 K_\phi^{0,9}) / (1 + 1,209 K_\phi^{0,9})$ раз.

Согласно последнему выражению уменьшение ОСП составляет 5,64 (при $K_\phi = 0,5$), 7,03 (при $K_\phi = 1$), 9,43 (при $K_\phi = 4$), 12,14 (при $K_\phi = 9$).

Эффективность использования операции фильтрации для повышения ОСП в условиях нестационарных шумов и изменений формы сигнала при проведении контроля или диагностики объектов не может быть значимой особенно при $ОСП \leq 1$. Требуется адаптировать параметры фильтра к случайным трансформациям в регистрируемых процессах. Варианты такой адаптации возможны в активных системах контроля и диагностики, когда нет ограничений на повторение контрольной операции. Один из них, ориентированный на подстройку параметров фильтра под неизвестную форму информационного сигнала, рассмотрен ниже.

IV. ВАРИАНТ АЛГОРИТМА АУТОПОДСТРОЙКИ ФИЛЬТРА ПОД ТЕКУЩИЙ СИГНАЛ

Структурная схема системы активного контроля в достаточно общем виде включает блок сравнения параметров контролируемого и эталонного объектов 1, блок адаптации системы фильтрации к изменениям формы информационных сигналов 2, блок принятия решений 3 и блок анализа структуры сопутствующих шумов 4 (рис. 1).

Под воздействием генератора Г на эталонный Эт и контролируемый ОК объекты формируются отклики, разность которых выходе системы вычитания В, замаскированная шумом, поступает на блоки 2, 3 для дальнейшего анализа и принятия решений.

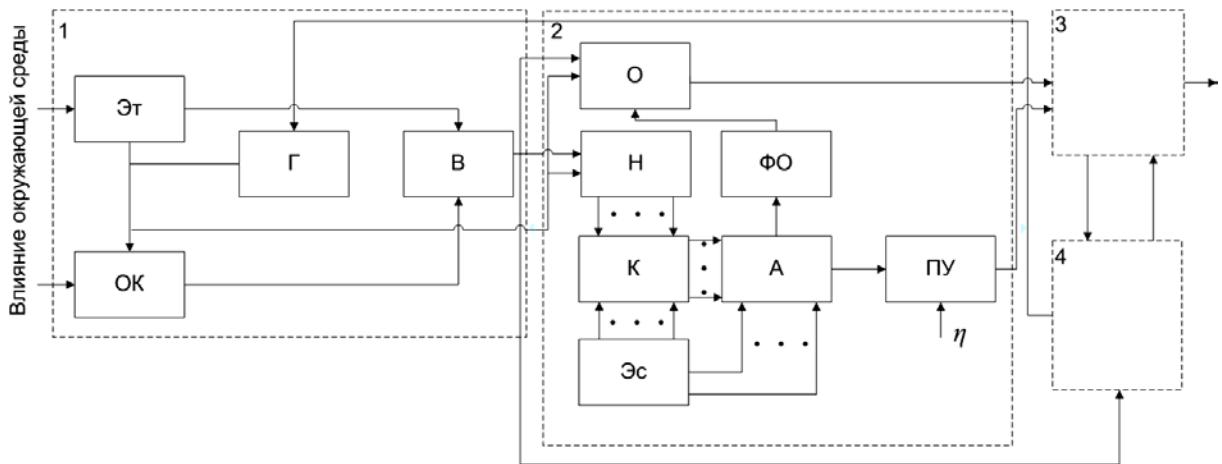


Рис. 1. Структурная схема активного контроля (вариант):

1 – блок сравнения параметров контролируемого и эталонного объектов, 2 – блок адаптации системы фильтрации к изменениям формы информационных сигналов, 3 – блок принятия решений, 4 – блок анализа структуры шумов, расшифровка буквенных обозначений приведена в тексте

В блоке 2 реализуется операция фильтрации случайного процесса, поступающего со схемы В. Основным элементом блока является корреляционный обнаружитель О, осуществляющий операцию свертки ожидаемого сигнала (на выходе схемы ФО) с поступающими на его вход в интервале существования сигнала на выходе генератора Г. В течение этого времени входной сигнал одновременно заносится в накопитель Н, и накопленная сумма коррелируется (схема К) с совокупностью возможных откликов, записанных в схеме Эс. Анализатор А по максимальному коэффициенту корреляции определяет форму присутствующего в регистрируемом процессе сигнала и переносит его в схему ФО. При превышении этого коэффициента корреляции заданного порога сходства η формируется сигнал «Завершение автоподстройки обнаружителя», по которому блок 3 извещает блок 4 об окончании операции по оценке формы сигнала в шумовом процессе и приступает к формированию решения о состоянии объекта контроля.

Таким образом, функция блока 2: используя принцип накопления, выявить структуру отклика – результата сравнения реакций контролируемого и эталонного объектов на зондирующие воздействия по степени сходства с возможными вариантами таких откликов для выбора наиболее вероятного из них.

V. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Будем оперировать одномерными процессами. Данное условие позволяет упростить вычислительные процедуры без изменения общности выводов по результатам исследования.

Шумовой процесс с заданными параметрами можно получить несколькими способами. Наиболее простой из них реализует алгоритм Хабиби [10]. Рекуррентная формула для получения реализации случайного процесса имеет вид

$$\xi_i = \rho \xi_{i-1} + \sigma \sqrt{1 - \rho} \cdot a_i,$$

где ξ_i – значение процесса в точке i , σ – среднеквадратичное отклонение, a_i – значения случайной величины, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_a^2 , ρ – коэффициент корреляции соседних элементов процесса.

Для получения случайных процессов с желаемой корреляционной функцией будем использовать следующий подход. Формируется процесс

$$\xi_i = \mu^{-0,5} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (-2 \ln \alpha_{n,m})^{0,5} \cos(i\mu_n \cos \omega_m + 2\pi\beta_{n,m}), \quad (7)$$

где $\mu_n = \rho \sqrt{\gamma_n^{-1} - 1}$, $\alpha_{n,m}$, $\beta_{n,m}$, γ_n – независимые случайные величины, равномерно распределенные на интервале (0,1), M и N – границы задания параметров n и m . Суперпозицией процессов вида (7) можно получить случайный гауссовый процесс с любым видом корреляционной функции [10], отличие которой от задаваемой зави-

сит от M и N . При $M = N = 100$ это отличие составило 2,84 % для $R(\tau) = J_a(\rho\tau)$, J_a – функция Бесселя второго рода и 5,36 % для $R(\tau) = \exp(-\rho\tau)$.

Форма полезных сигналов для проведения эксперимента: прямоугольный, косинусоидальный, гауссоидальный импульсы.

На вход фильтра, настроенного на обнаружение прямоугольного импульса, подавались реализации «сигнал плюс шум». Каждая очередная реализация складывалась с предыдущей и находились коэффициенты корреляции с записанными в памяти Эс сигналами различных форм. Находились также коэффициенты корреляции с шумовыми реализациями. В первом и втором случаях оценивались плотности распределения вероятностей этих коэффициентов. Определялась точка пересечения распределений, определяющая порог принятия решений (стратегия идеального наблюдателя), необходимый для оценки вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода. Полученный результат моделирования представлен на рис. 2. Наблюдается совпадение с результатами теоретического анализа, приведенными выше.

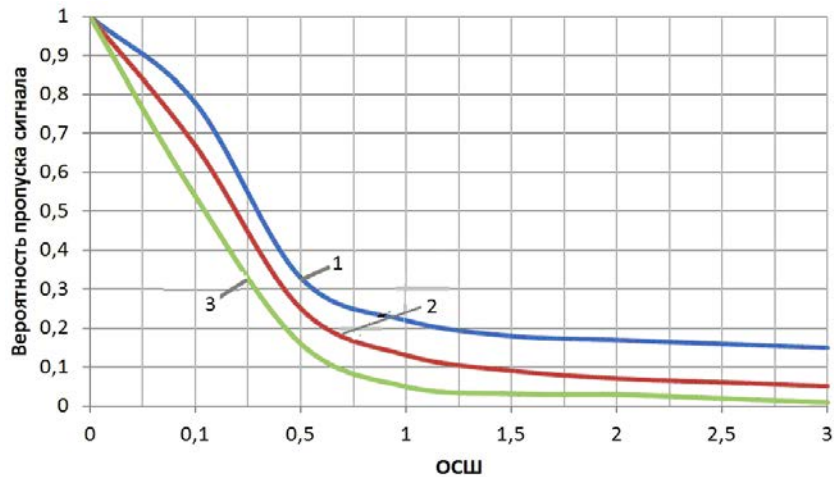


Рис. 2. Зависимость вероятности пропуска сигнала от отношения сигнал/шум на выходе согласованного с прямоугольным импульсом фильтра при поступлении с сопутствующим шумом гауссоидального (1), косинусоидального (2) и прямоугольного (3) импульсов и вероятности ложной тревоги 0,05

Что касается времени установления формы присутствующего в шумах сигнала, о его величине можно судить по графикам на рис. 3

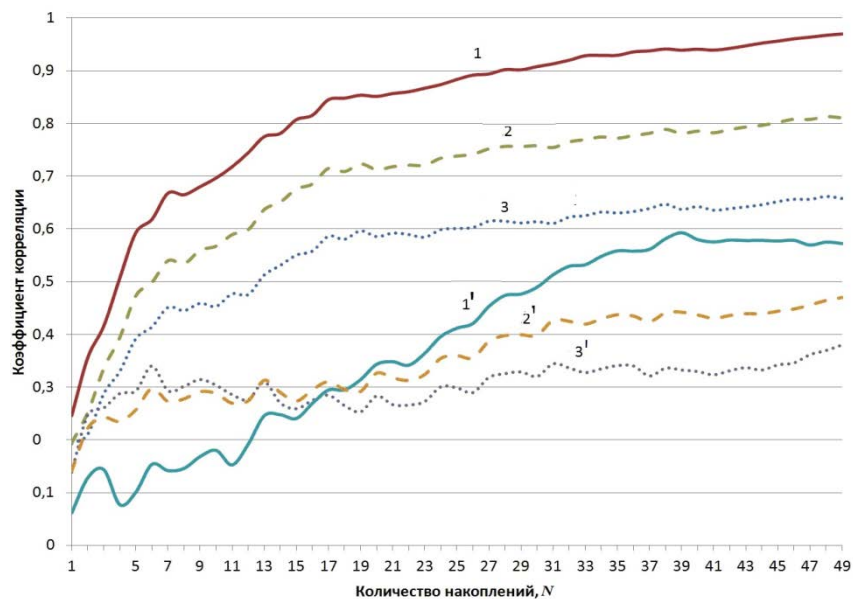


Рис. 3. Зависимость коэффициентов корреляции сигнала прямоугольной формы с накапливаемой суммой сигнал+шум для разных форм сигналов: 1,1' – прямоугольного; 2,2' – косинусоидального; 3,3' – гауссоидального импульсов при ОСШ=0,1 (1', 2', 3') и 0,25 (1, 2, 3)

При низком ОСШ надежность принимаемых решений о форме замаскированного шумом сигнала достаточно высока при количестве накоплений более 30. При $ОСШ = 0,25$ можно снизить эту величину вдвое.

VI. ВЫВОДЫ

В системах активного контроля, функционирующих в условиях интенсивных нестационарных шумов, и изменениях формы поискового сигнала ведение операции подстройки систем фильтрации к этим условиям дает значительный эффект.

В качестве алгоритма такой подстройки можно рекомендовать реализацию корреляционного обнаружителя ожидаемых модификаций сигналов, обеспечивающего поднастройку системы при незначительном количестве накоплений регистрируемых реализаций в условиях низкого $ОСШ < 1$.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ по заданию № 212 на 2016 год, Министерства образования и науки Омской области и РФФИ проект № 15-48-04172.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
2. Щербаков Г. Н., Анцелевич М. А. Новые методы обнаружения скрытых объектов. М.: Эльф ИПР, 2011. 503 с.
3. Шайдуров Г. Я., Кудинов Д. С., Романова Г. Н. [и др.]. Радиолокационный метод обнаружения миноподобных объектов с использованием сейсмических ударов // Специальная техника. 2013. № 6. С. 15–19.
4. Бархатов В. А. Обнаружение сигналов и их классификация с помощью распознавания образов // Дефектоскопия. 2006. № 4. С. 14–26.
5. Luo G. [et al.]. Human action detection via boosted local motion histograms // Machine Vision and Applications. 2010. Vol. 21, no. 3. P. 377–389.
6. Епифанцев Б. Н., Пятков А. А., Копейкин С. А. Мультисенсорные системы мониторинга территорий ограниченного доступа: возможность видеоаналитического канала обнаружения вторжений // Компьютерная оптика. 2016. № 1. С. 121–129.
7. Воробейчиков С. Э., Фокин В. А., Удод В. А., Темник А. К. Исследование двух алгоритмов распознавания образов для классификации дефектов в объекте контроля по его цифровому изображению // Дефектоскопия. 2015. Т. 51, № 10. С. 54–63.
8. Епифанцев Б. Н., Ляховский В. С. Обнаружение объектов простых форм человеком и автоматом на неподвижных изображениях подстилающей поверхности // Оптический журнал. 2016. № 1. С. 65–72.
9. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблица интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1963. 1100 с.
10. Пригарин С. М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. Новосибирск: ИВМ и МТ СОРАН, 2005. 259 с.

УДК 004.82

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ИС С УЧЕТОМ РАСЧЕТНОГО УРОВНЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

И. З. Краснов

¹*Сибирский федеральный университет, институт космических и информационных технологий,
г. Красноярск, Россия*

Аннотация – В данной работе авторами предлагается методика расчета уровня компетентности человека относительно требуемого вида деятельности. Представленная методика позволяет руководителю принять решение по распределению ресурсов между членами команды в соответствии с психологической предрасположенностью каждого к деятельности. В результате практического применения методики была выявлена основная область применения, которой являются организации, чья деятельность основана на информационных технологиях с целью выработки управленческого решения по формированию эффективных команд инновационной деятельности.

Ключевые слова: компетентность, системный анализ, творческий потенциал, системный подход, эффективное управленческое решение, создание команды.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день разработка теоретических основ и экспериментальных подходов в психологии и развитии информационных технологий дала возможность решить проблему оценки психологических качеств в деятельности человека с учетом уровня его подготовки.

Профессиональная предрасположенность человека к конкретному виду деятельности связана с его генетической предрасположенностью к определенному виду деятельности, определяющаяся задатками и способностями [1]. Творческая сила человека состоит в разнотипности его психологических особенностей, определяющих силу его интеллекта, таланта, способностей и культуры мышления [2]. Каждый человек уникален в конкретно своем виде деятельности, поэтому для получения эффективной команды необходим инструмент, позволяющий руководителю, не обладающему знаниями в психологии и информационных технологиях, принять эффективное управленческое решение по созданию команды. Данный подход позволяет увеличить творческий потенциал человека при условии снижения уровня несвойственной деятельности. Это способствует эффективному сбору, обработке информации и, как следствие, творческой деятельности, включая и элементы самоорганизации [3].

Системный подход в решении задач подготовки управленческих решений

В основном задача управления системой сегодня скорее искусство, чем наука. Обусловлено это тем, что присутствие человека в исследуемом процессе требует учета факторов, а именно: морального, психологического, а также свойств личности, обусловленных психологическими особенностями, свойственными человеку для определенного вида деятельности. Наиболее важными из них являются искажение информации о своих возможностях, достижении поставленных целей, способах и средствах решения задач [4]. Это заостряет взгляд на проблеме, которая усугубляется отсутствием системы идентификации пользователей информационной системы по психологической предрасположенности каждого к требуемому виду деятельности.

Характерной особенностью решаемой проблемы является неполнота априорных данных, неопределенность, взаимосвязанность, трудность в формировании согласованных целей и способов их достижения, что приводит к необходимости формировать задачи управленческого характера с целью объединения в единую систему человеческого потенциала и информационных ресурсов системы [5]. Также это приводит к необходимости обеспечения комплексной поддержкой управленческих решений руководителей, не обладающих достаточным уровнем психологических и узкоспециализированных знаний в области информатизации процессов принятия решений и управления системами, что обуславливается сложностью подготовительных мероприятий по подбору и расстановке людей в команде.

Ценность системного подхода состоит в том, что рассмотрение категорий системного анализа создает основу для логического и последовательного подхода к проблеме принятия решений. Эффективность решения проблем с помощью системного анализа определяется структурой решаемых проблем. Для решения слабо структурированных проблем используется методология системного анализа, системы поддержки принятия решений (СППР), где процедура принятия решения включает в себя на первом этапе формулировку проблемной ситуации и поиск оптимального варианта решения. В нашем случае это принятие управленческого решения на основе расчетного уровня компетентности человека относительно требуемого вида деятельности.

Метод анализа иерархий. Расчет компетентностей сотрудников

Метод анализа иерархий (МАИ) – математический инструмент системного подхода к сложным проблемам принятия решений [6]. МАИ не предписывает лицу, принимающему решение (ЛПР), какого-либо «правильного» решения, а позволяет ему в интерактивном режиме найти вариант, который наилучшим образом согласуется с его пониманием сути проблемы и требованиями к её решению. МАИ позволяет понятным и рациональным образом структурировать сложную проблему принятия решений в виде иерархии, сравнить и выполнить количественную оценку альтернативных вариантов решения. Следующим этапом анализа является определение приоритетов с помощью процедуры парных сравнений с учетом психологической предрасположенности человека к конкретному виду деятельности и образовательных характеристик.

Введем необходимые понятия. Цветовые индикаторы (ЦИ) психологической предрасположенности человека к конкретному виду деятельности (P_i). Образовательные характеристики пользователя (Q_i) – профильное образование и опыт работы или отсутствие такового в векторе деятельности (D_i).

Анализ результатов программы психодиагностики позволяет принять решение о предрасположенности человека к требуемому виду деятельности и присвоить цветовой индикатор (ЦИ) психологической предрасположенности к деятельности [1]. На сегодняшний момент основным недостатком любой организации является то, что руководителями не учитываются психологические предрасположенности человека к конкретному виду деятельности с учетом образовательных характеристик. Каждой категории пользователей возможно присвоить соответствующий тип психологической предрасположенности к конкретной деятельности [1]:

- психологический тип P_1 – иррациональные экстраверты;

- психологический тип P_2 – рациональные экстраверты;
- психологический тип P_3 – рациональные интроверты;
- психологический тип P_4 – иррациональные интроверты.

Классификация по психологическим типам позволяет перегруппировать пользователей, распределяя их по соответствующим кластерам при условии однотипных психологических характеристик. В данной работе мы соотносим психологический тип (P_i) с видом требуемой деятельности с учетом образовательных характеристик пользователя.

Приведем классификацию рассматриваемых видов деятельности.

- D_1 – коммуникативная деятельность;
- D_2 – деятельность, связанная с управлением;
- D_3 – деятельность, связанная с четким выполнением задач в соответствии с регламентом, поддержание устойчивого состояния системы в рамках установленных правил и регламентов;
- D_4 – творческая деятельность инновационного типа, поиск решений нестандартных задач.

Компетентность (КМ) считается высокой, если психологические предрасположенности и характеристики соответствуют деятельности, требуемой от человека. Соответственно, выполняется условие, если $P_1=Q_1=D_1$, то $КМ=1$.

Для заданного вида деятельности $D_1 = P_1 > P_4 > P_2 > P_3$; соответственно, для $D_2 = P_2 > P_3 > P_1 > P_4$; для $D_3 = P_3 > P_2 > P_4 > P_1$; для $D_4 = P_4 > P_1 > P_3 > P_2$. Для D_k ($k=1,2,3,4$) введем количественную характеристику P_{ij}^k , обозначающую отношение психологического типа P_i к типу P_j относительно этого вида деятельности.

ТАБЛИЦА 1.
СООТВЕТСТВИЕ P_{ij}^k И P_i

D_k	P_1	P_2	P_3	P_4
P_1	P_{11}^k	P_{12}^k	P_{13}^k	P_{14}^k
P_2	P_{21}^k	P_{22}^k	P_{23}^k	P_{24}^k
P_3	P_{31}^k	P_{32}^k	P_{33}^k	P_{34}^k
P_4	P_{41}^k	P_{42}^k	P_{43}^k	P_{44}^k

Логика присвоения значений величинам P_{ij}^k , которые могут принимать значения вида n или $1/n$, где $n=1, 3, 5, 7, 9, 11, 13$, где для вида деятельности D_k психологические типы имеют следующие приоритеты: P_a – наиболее приоритетный тип, далее идут типы P_b, P_c, P_d . Тогда $P_{ab}^k=3, P_{bc}^k=5, P_{cd}^k=7, P_{ac}^k=9, P_{bd}^k=11, P_{ad}^k=13$. Далее, $P_{ji}^k=1/P_{ij}^k$, откуда, в частности, $P_{ii}^k=1$.

Здесь значение 1 означает отсутствие приоритета (одинаковая значимость), 3 – слабое преимущество, 13 – абсолютное преимущество, а 5, 7, 9, 11 соответствуют промежуточным значениям на шкале приоритетов.

Отметим, что теперь порядок приоритетов не меняется относительно вида деятельности, например, Q_1 (наличие образования и опыта) всегда будет иметь первый приоритет по отношению к любому из видов деятельности и т.д.

Логика присвоения значений величинам Q_{ij} , которые принимают значения вида n или $1/n$, где $n=1, 2, 4, 5, 8, 10, 12$. Значения имеют вид: $Q_{12}=2, Q_{23}=4, Q_{34}=6, Q_{13}=8, Q_{24}=10, Q_{34}=12$. Далее, $Q_{ji}=1/Q_{ij}$, откуда, в частности, $Q_{ii}=1$.

Следует отметить, что приоритеты образовательных характеристик имеют значения (1, 2, 4, 5, 8, 10, 12) меньше, чем соответствующие приоритеты психологических типов (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13). Данное обстоятельство отражает тот факт, что в предложенной модели расчетов психологический тип имеет большее значение для расчета уровня компетентности по сравнению с образовательной характеристикой. Данная модель может использоваться и в ситуации, когда образовательным характеристикам будет дано большее предпочтение перед психологическими типами. В этом случае нужно поменять значения приоритетов (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 – для образовательных характеристик и 1, 2, 4, 5, 8, 10, 12 – для психологических типов). Экспертным мнением установим приоритеты Q_i между собой. Q_i соотносятся между собой, как $Q_1 > Q_2 > Q_3 > Q_4$.

Выполнив расчеты, получаем ожидаемое распределение, где максимальный уровень компетентности у человека, который по своим психологическим и образовательным характеристикам максимально соответствует этому требуемому виду деятельности – P_1Q_1 , а минимальное соответствие у пользователя с низким уровнем компетентности для этого вида деятельности – P_3Q_4 .

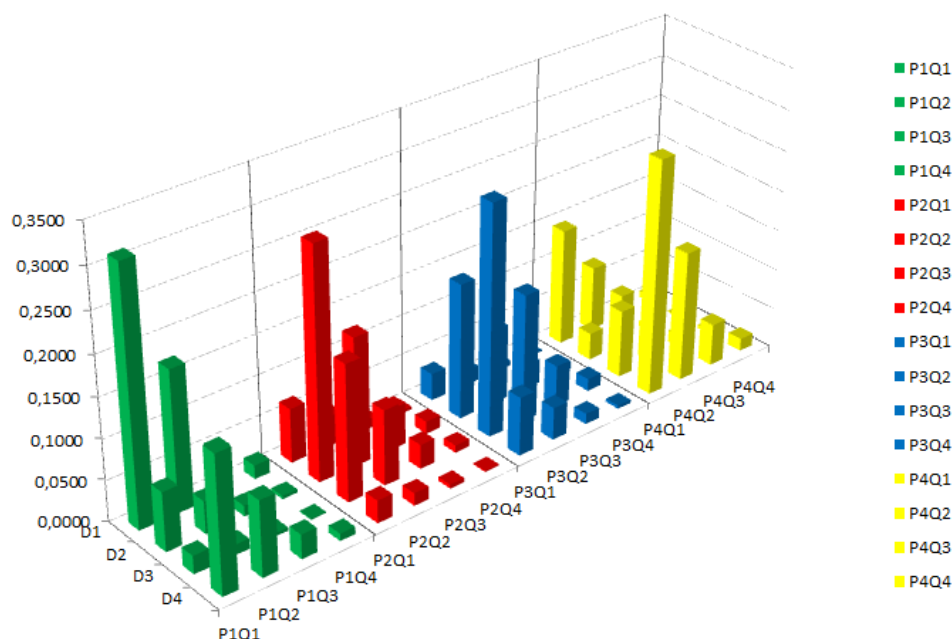


Рис. 1. Результирующее распределение уровней компетентности относительно требуемого вида деятельности

Аналогичным образом производятся расчеты для остальных видов деятельности (D_2, D_3, D_4). Предложенный математический аппарат расчета уровней компетентности пользователей позволяет вводить в переменные психологической предрасположенности D_i и видов деятельности P_i , дополнительные значения i , которая может принимать значение как от 1 до 8, так и от 1 до 16 в зависимости от требований, предъявляемых к деятельности пользователей в информационной системе. В типологии существует 16 психологических типов личности, для простоты понимания мы оперируем в данной работе только 4 основными.

II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод расчета уровня компетентности позволяет решать целый ряд задач развития и управления в организации. Существенным является не только динамика и рост масштабов качества самовыражения, но и использование изначального потенциала человека для достижения поставленных целей [7]. Специфика деятельности к созиданию состоит в том, чтобы каждый человек соответствовал стратегии развития организации в векторе творческих способностей [8].

Данная методика применялась для расчета уровня компетентности с целью выявления склонности к творчеству в инженерном деле среди студентов выпускных курсов Института Космических и Информационных Технологий (ИКИТ) СФУ. Также данный метод успешно реализован в рамках мероприятий бизнес-акселератора начального уровня (АНО «МИКС») на базе Красноярского регионального инновационно-технологического бизнес-инкубатора (КГАУ «КРИТБИ»), при организации площадки для научно-инженерного сообщества в Кластере инновационных технологий ЗАТО г. Железногорск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснов И. З. Дифференцированный подход к подготовке специалистов информационной безопасности // Решетневские чтения. 2013. Т. 2, № 17. С. 301–304.
2. Эдгар Ш. Организационная культура и лидерство. СПб.: Питер, 2008. 336 с.
3. Новиков Д. А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. М.: ЛЕНАНД, 2016. 160 с.
4. Волобуев С. В. Философия устойчивости социотехнических систем: информационные аспекты. М.: Вузовская книга, 2004. 360 с.
5. Медведев А. В. Основы адаптивных систем / Сиб. Гос. Аэрокосмическая академия. Красноярск, 2015. 526 с.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь. 1993. 278 с.
7. Лебедев С. А. Философия математики и технических наук. М.: Академический проект, 2006. 784 с.
8. Виханский О. С., Наумов А. И. Менеджмент: человек, стратегия, организация, процесс. М.: МГУ, 1995. 416 с.

УДК 004.056.53+004.93

СПОСОБЫ ГЕНЕРАЦИИ КЛЮЧЕВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
НА ОСНОВЕ КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКАП. С. Ложников¹, А. Е. Сулавко¹, Е. В. Бурая², А. В. Еременко³,¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия²Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия³Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Аннотация – Предложено несколько вариаций нечетких экстракторов для генерации криптографических ключей и паролей на основе параметров клавиатурного почерка. Проведена серия вычислительных экспериментов по оценке эффективности предложенных методик, определены оптимальные параметры нечетких экстракторов. Наилучший результат составил: $FRR=0,061$, $FAR=0,023$ при длине ключа 192 бит.

Ключевые слова: нечеткий экстрактор, помехоустойчивое кодирование, биометрия, клавиатурный почерк, непрерывный мониторинг.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день киберпреступность беспокоит не только специалистов по информационным технологиям и информационной безопасности. Инциденты в сфере кибербезопасности затрагивают интересы и высшего руководства организаций. По данным глобальных аналитических исследований PricewaterhouseCoopers (PwC) число инцидентов и объем причиняемого ими ущерба неуклонно растут. В 2014 году количество инцидентов составило 42,8 миллиона [1]. Это означает, что в среднем каждый день совершалось 117 339 кибератак. Средний ущерб для одной крупной организации в 2014 и 2015 году составил 2,7 и 2,5 млн долларов соответственно [2]. Если анализировать ситуацию за длительный период, то с 2009 года совокупный среднегодовой темп роста числа выявленных инцидентов информационной безопасности ежегодно увеличивался на 66% [1–2].

Традиционным способом защиты информации от несанкционированных воздействий является шифрование. Современные алгоритмы шифрования предоставляют достаточно высокий уровень защищенности. Однако вопросы выбора ключей для асимметричного и симметричного шифрования, а также их защиты во время хранения и передачи отнюдь не тривиальны, их проработка требует внушительных финансовых затрат. Если найти устойчивые преобразования для осуществления однозначной и неотъемлемой «привязки» ключа для шифрования к биометрическим характеристикам каждой конкретной личности, данные вопросы можно будет считать закрытыми. Настоящая работа направлена на разработку методов «привязки» клавиатурного почерка человека к криптографическим ключам и посвящена поиску таких преобразований.

В отличие от статических признаков, для хищения и изготовления «муляжа» которых на сегодняшний день существует множество способов, фальсифицировать образ клавиатурного почерка проблематично. Парольное слово (или фразу) можно сохранить в тайне, а также изменить. Варианты замены для статических признаков (радужная оболочка глаза, отпечаток пальца, геометрия ладони) ограничиваются количеством органов субъекта.

II. ДОСТИГНУТЫЕ РАНЕЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ГЕНЕРАЦИИ КЛЮЧЕЙ НА ОСНОВЕ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Показателями надежности генерации ключа являются вероятности ошибки первого рода (FRR – False Rejection Rate, несовпадение ключа, генерируемого из признаков одного и того же субъекта) и второго рода (FAR – False Accept Rate, совпадение ключа, генерируемого из признаков двух различных субъектов). Коэффициентом равновероятной ошибки EER называется общий процент (вероятность) ошибочных решений, если $EER=FRR=FAR$.

Аналитический обзор методик генерации ключа показал низкое количество работ, описывающих способы генерации ключей на основе параметров клавиатурного почерка. Известны системы генерации ключа на основе отпечатка пальца [3–4], радужной оболочки глаза [5–7], изображения лица субъекта [8–9], подписи [10–11], клавиатурного почерка [12], голоса [13], а также мультифакторные системы [14–15]. При этом показатели надежности генерации ключа на основе статических биометрических признаков (отпечаток пальца, радужка) составляют порядка: $FRR=0,005-0,055$ и $FAR\approx 0$, длина генерируемого ключа составляет 140–327 бит. Для динамических биометрических признаков (подпись, клавиатурный почерк) данные показатели ориентировочно равны: $FRR\approx FAR\approx 0,09-0,12$ при длине ключа до 100 бит.

III. БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКА

Идентификация личности по клавиатурному почерку, как и генерация на его основе ключевого материала (который также может быть использован для идентификации), имеет ряд привлекательных сторон. Во-первых, для этого не требуется специального оборудования. Во-вторых, ввод пароля или парольной фразы – привычный и основной способ подтверждения личности пользователя в компьютерных системах.

Обычно в качестве признаков клавиатурного почерка используются временные интервалы между нажатием клавиш, характеризующие темп работы с клавиатурой, и временные интервалы удержания клавиш, характеризующие стиль работы с клавиатурой [16]. Информативность парольной фразы определяется ее длиной. Временные интервалы содержат информацию о субъекте, имеющем выработанный клавиатурный почерк. В процессе обучения оператор подбирает удачные решения задачи набора текста на клавиатуре и запоминает их путем многократных повторений. Программы управления мышцами запоминаются в подсознательной сфере субъекта и реализуются автоматически. Временные интервалы характеризуются нормальным законом распределения.

Известны работы, в которых также анализировалась сила нажатия (давление) на клавиши [17], которую можно измерить специальными малогабаритными датчиками (их необходимо встроить в клавиатуру), а также вибрация клавиатуры при нажатии на клавиши [18]. Авторами работы [19] создана клавиатура, которая способна не только идентифицировать хозяина, но и определить некоторые личностные характеристики печатающего субъекта. Принцип действия клавиатуры [36] основан на трибоэлектрическом эффекте – процессе перетекания электрического заряда с одного материала (в данном случае кожи пальца) на поверхность другого (его роль играет полиэтилентерефталат (ПЭТ) – термопластик) при их контакте друг с другом. Формирующиеся при нажатии клавиш сигналы характеризуются напряжением и силой тока, которые являются функциями времени. Эти сигналы коррелируют с особенностями динамики ввода текста, размерами подушечек пальцев и их биоэлектрическим потенциалом. Они характеризуют не только время нажатия, но и количественно описывают конкретные динамические изменения в процессе набора текста.

В данном исследовании решено ограничиться признаками, которые можно зарегистрировать при помощи обычной клавиатуры. Для сбора данных клавиатурного почерка было привлечено 80 испытуемых. Каждым испытуемым по 50 раз были введены 3 фиксированные парольные фразы на русском языке, а также одна фраза, выбранная субъектом самостоятельно. Фразы состояли из 20 – 40 символов (включая пробелы), данная длина парольной фразы предложена как рекомендуемая (слишком длинные парольные фразы сложно запоминать и воспроизводить, велика вероятность ошибки при наборе фразы на клавиатуре). Таким образом, было собрано 12000 реализаций известных парольных фраз и 4000 реализаций тайных парольных фраз. Кроме того, каждым субъектом был произведен непрерывный ввод произвольного текста на русском языке, состоящего из 9000 символов. При вводе регистрировались коды клавиш, времена удержания и паузы между нажатием клавиш.

Каждую парольную фразу решено представить в виде массива времен удержания и пауз между нажатием фактически нажатых клавиш. Время удержания каждой отдельной клавиши незначительно зависит от последовательности нажимаемых клавиш, в отличие от пауз между нажатием клавиш, где эталонное описание требуется создавать для всех пар клавиш, либо для наиболее информативных пар. При непрерывном вводе текста использовать паузы между нажатием сложно, т.к. требуется слишком долгая процедура обучения (пользователь должен напечатать большой объем текстов для создания эталона всех информативных сочетаний клавиш). Поэтому образцы клавиатурного почерка при вводе текста решено преобразовать в массив времен удержания клавиш (удалив информацию о паузах между их нажатием). Таким образом, планируется проверить 2 подхода к генерации ключей: с использованием фиксированных парольных фраз (тайных и открытых) и произвольного фрагмента текста.

IV. МЕТОД НЕЧЕТКИХ ЭКСТРАКТОРОВ

«Нечетким экстрактором» называют метод (или общий алгоритм), выделяющий случайные, равномерно распределенные последовательности битов из биометрических данных в условиях зашумленности [19]. «Нечеткие экстракторы» способны компенсировать ошибки, возникающие вследствие технической невозможности получения одинаковых значений биометрических характеристик при их повторном вводе субъектом. Такие алгоритмы базируются на теории информации и помехоустойчивом кодировании и обычно используются для получения криптографических ключей без необходимости их хранения в промежутках между обращениями к ним [19]. Изначально случайным образом генерируется битовая последовательность, которая кодируется помехоустойчивым кодом [20]. В качестве кодов, исправляющих ошибки, могут использоваться коды Хемминга, Адамара, Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ-коды), Рида–Соломона (являются частным случаем БЧХ). Сгенерированная последовательность объединяется с эталонными характеристиками биометрических признаков субъекта (биометрическим эталоном), в качестве которых в настоящей работе предполагается использовать вектор средних значений выбранных признаков. Способ объединения сложение по модулю 2. Результат объ-

единения – открытая строка, которая может храниться на общедоступном сервере. Чтобы получить сгенерированную ранее последовательность (ключ) субъект вводит новую реализацию биометрических признаков, которая обрабатывается соответствующим образом и «вычитается» из открытой строки. После «отсоединения» биометрических данных полученная битовая последовательность будет изменена, вследствие отличия предъявленных биометрических данных от эталонных. После применения кода, исправляющего ошибки к полученной строке, в случае высокой степени «схожести» предъявленного биометрического образа и эталонного (т.е., если количество несовпадающих бит эталонных и предъявленных значений признаков не превысит исправляющую способность кода), будет найдена исходная последовательность бит, которая и является ключом. Если предъявленные биометрические данные будут достаточно близки к эталонным, то исходная случайная строка и восстановленная строка будут равны и будет сгенерирован верный ключ. На практике можно осуществлять хеширование восстанавливаемой строки, если требуется получать на выходе строку фиксированной длины, однако стойкость генерируемого ключа определяется длиной кодируемой (восстановленной) строки в исходном виде. Под близостью подразумевается количество допущенных ошибок, которое может исправить помехоустойчивый код (количество отличающихся бит, байт, значений признаков – это зависит от используемого алгоритма кодирования и декодирования). Например, в метрике Хемминга, если каждый признак кодируется 8 битами, близость образов определяется по формуле: $HD = E \oplus R / (n \cdot 8)$, где E – вектор эталонных значений признаков, R – вектор предъявляемых значений признаков.

Таким образом, типовая структура нечеткого экстрактора позволяет производить модификации по следующим основным направлениям:

- 1) способы представления эталонных и предъявляемых значений признаков;
- 2) способы «объединения» и «разделения» битовых последовательностей и закодированной строки;
- 3) способы помехоустойчивого кодирования и декодирования генерируемых случайных строк.

Первое направление подразумевает разработку способов округления, трансляции, кодирования или иных преобразований над значениями признаков, результатом которых будет битовая последовательность, зависящая от биометрических характеристик. Очевидно, что «сырые» биометрические данные по большей части состоят из неинформативных частей. Целесообразно минимизировать количество нестабильных бит или признаков при их преобразовании в битовую последовательность. Решено кодировать значение каждого признака одним байтом при формировании битовой последовательности из биометрических признаков. Решено кодировать каждое исходное значение признака одним байтом. Для этого предложено 3 способа, которые были протестированы в сочетании с различными алгоритмами кодирования. Каждый способ представляет собой отображение области значений признака на множество $Y: y=f(x)$, где исходное значение признака. Различие способов определяются областью преобразованных значений признака. Для первого способа $Y = \{0, 1, 3, 7, 15, 31, 63, 127\}$, для второго – $Y = \{0, 1, 3, 7, 15, 31, 63, 127, 255, 254, 252, 248, 240, 224, 192, 128\}$, для третьего – y – целое число от 0 до 255. Выходное значение y представляется в двоичном виде. Предполагается, что область значений признаков x может являться общедоступной информацией для пользователей.

Далее независимо от подхода производится «склейка» битовых последовательностей в одну результирующую, которая впоследствии «объединяется» со случайной последовательностью для получения открытой строки. В работе [21], показана связь эффективности коррекции ошибок с методами группирования битов с разной вероятностью единичной ошибки. Несмотря на предпринятые в данном направлении усилия, единого подхода для решения этого вопроса до сих пор выработано не было. В настоящей работе результирующая последовательность формируется в 2 этапа:

- оценка и ранжирование признаков по информативности;
- конкатенация битовых представлений преобразованных признаков.

Под информативностью подразумевается интегральный показатель стабильности бит в преобразованном значении признака. Для каждого признака по всем отобраным для создания эталона реализациям вычисляется относительная частота появления единичных бит в битовом представлении значений признаков. Далее определяется интегральная оценка стабильности бит преобразованного значения признака, как произведение относительных частот появления единичных и нулевых значений бит во всех разрядах. Относительные частоты 0 или 1 заменяются в некоторое число, приближенное по значению к 0 и 1, но не равное им (чтобы общее произведение не стало равным нулю). Чем больше разрядов будет иметь частоты, близкие к 0 или 1, тем меньше получится итоговое произведение и тем выше интегральная оценка стабильности (информативности) признака для субъекта. Далее изменяется порядок признаков – от наиболее информативного к наименее информативному, выбирается определенное количество признаков, остальные исключаются. Оптимальное количество признаков, при котором вероятности ошибок 1-го и 2-го рода будут наименьшими – параметр экстрактора, который для каждой задачи будет различным. В настоящем исследовании данный параметр определялся посредством серии

вычислительных экспериментов для каждого исходного набора признаков. Количество информативных признаков и их последовательность требуется хранить на отдельном носителе или выделенном сервере.

Второе направление подразумевает разработку способов «объединения» и «разъединения» битовых последовательностей, которые обычно сводятся к операции сложения по модулю 2. Изначально планировалось разработать модифицированные способы на основе правил нечеткой логики, адаптировав для этого один из алгоритмов нечеткого вывода (апробировав данный способ в задаче генерации ключей на основе подписей субъектов [22]). Нечеткий вывод планировалось осуществлять как отображение функции принадлежности значения признака к субъекту (функция принадлежности должна определяться на основе функции плотности распределения признака или быть равной ей) на закодированную битовую последовательность (закодированную строку). Однако при таком подходе фактически требуется хранить эталон. Такой подход сводит на нет основное преимущество нечетких экстракторов – отсутствие необходимости в хранении эталонных описаний образов. Поэтому от разработки модификаций данных процедур пришлось отказаться.

Последнее направление заключается в выборе оптимального алгоритма помехоустойчивого кодирования и декодирования. На данном уровне требуется обеспечить высокую степень восстановления ключевого материала при наименьшей избыточности кода. Требуется найти наиболее эффективный алгоритм и оптимальное соотношение исправляющей способности кода и других параметров, при котором вероятности ошибок 1-го и 2-го рода и избыточность помехоустойчивого кода будут наименьшими для заданного пространства признаков. Стойкость генерируемых ключей определяется длиной кодируемой строки и чем больше избыточность кода, тем длинней закодированная строка и тем больше требуется биометрических признаков, чтобы «покрыть» ее целиком при «объединении». В рамках данного направления решено апробировать два принципиально разных кода, исправляющих ошибки: помехоустойчивое кодирование Адамара и БЧХ-коды [20]. От использования кодов Хемминга априорно решено отказаться вследствие их высокой избыточности (на 4 информативных бита приходится 3 бита синдромов ошибок) и низкой исправляющей способности (один бит на кодируемое сообщение). В кодах Адамара расстояние между любыми двумя кодовыми словами одинаково и совпадает с кодовым расстоянием, подобные коды называют эквидистантными. Коды Адамара, обладая большим кодовым расстоянием, позволяют соответственно исправить и большое количество ошибок. В качестве параметра коды Адамара принимают размер блока кодируемого сообщения. Оптимальное значение для рассматриваемого случая также вычислялось исходя из эксперимента, и для различного количества признаков составляет от 4 до 6 бит. Коды БЧХ – это широкий класс циклических кодов, применяемых для защиты информации от ошибок при ее передаче по каналам связи. Код БЧХ отличается возможностью построения кода с заранее определенными корректирующими свойствами. Оптимальная исправляющая способность кода зависит от количества признаков и определялась в процессе проведения вычислительного эксперимента. Среди возможных алгоритмов декодирования БЧХ-кодов алгоритм Берлекемпа–Мэсси, Евклидов алгоритм, алгоритм Питерсона–Горенштейна–Цирлера (ППЦ). Последний использовался в настоящей работе. Широко используемым подмножеством кодов БЧХ являются коды Рида–Соломона [20]. В данном исследовании решено ограничиться общей реализацией кодов БЧХ с возможностью задать исправляющую способность как параметр.

V. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ГЕНЕРАЦИИ КЛЮЧА НА ОСНОВЕ КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКА

Имеющиеся биометрические данные использовались для имитации процесса генерации секретных ключей, привязанных к субъекту. На первом этапе по равномерному закону генерируются сами ключевые последовательности (секретные ключи). Биометрические данные подаются в некотором количестве на вход экстрактора с заданными параметрами вместе с секретным ключом субъекта. На выходе экстрактора будет получена открытая строка. Оптимальное количество реализаций, необходимых для формирования открытой строки определяется в процессе эксперимента. Параметрами являются:

- a) способ округления;
- b) количество учитываемых (наиболее информативных) признаков;
- c) количество реализаций для открытой строки;
- d) алгоритм кодирования/декодирования;
- e) размер блока (для кодов Адамара);
- f) исправляющая способность кода (для кодов БЧХ).

На втором этапе производится генерация секретных ключей, т.е. восстановление исходных сгенерированных секретных ключей из открытой строки и их сравнения с первоначальными ключами. За FRR принимается ситуация, при которой система генерирует нехарактерное для субъекта (несовпадающее с оригиналом) значение ключа, т.е. чем ниже FRR, тем выше стабильность выработки ключа. При такой ошибке на практике пользователь услуги не сможет расшифровать данные или правильно подписать информационный ресурс при помощи ЭЦП. За FAR принимается ситуация, при которой ключи, полученные из биометрических данных двух

различных субъектов, совпадают. При такой ошибке может быть осуществлен несанкционированный доступ к зашифрованным данным, либо подделана ЭЦП. Процесс генерации ключей повторялся с различными сочетаниями параметров экстрактора для всех реализаций всех субъектов, имеющихся в базе. Наилучшие результаты эксперимента и их сравнение с достигнутыми ранее можно видеть в табл. 1 (достоверность результатов > 0,99).

ТАБЛИЦА 1

НАИЛУЧШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ГЕНЕРАЦИИ КЛЮЧЕВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
НА ОСНОВЕ КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКА

Признаки	Основные параметры и характеристики экстрактора ^а							
	СО	КР	ДК	КОД	FRR	FAR ₁	FAR ₂	ДИ
Фраза (1 образец)	4	30	48	БЧХ	0,104	0,009	0,021	0,005
Фраза (2 образца)	4	30	48	БЧХ	0,064	0,01	0,025	0,005
Текст (1500 символов)	4	30	192	БЧХ	0,061	0,023	-	0,02

^аСО – способ округления; КР – количество реализаций для формирования открытой строки; ДК – длина генерируемого ключа в битах; КОД – название кода, исправляющего ошибки; FAR₁ – вероятность ошибки 2-го рода для тайных биометрических образов; FAR₂ – вероятность ошибки 2-го рода для известных биометрических образов (подделок); ДО(ДИ) – достоверность и доверительный интервал (последнее указывается в скобках).

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Генерацию ключа приемлемой длины при достаточной надежности возможно осуществить только на основе ввода непрерывного текста (не менее 1500 символов). Разработан способ генерации ключа длиной 192 бита на основе клавиатурного почерка субъекта, регистрируемого при непрерывном вводе текста (от 1500 символов), на базе кодов БЧХ с применением процедуры оценки признаков по информативности индивидуально для каждого субъекта с вероятностью ошибок генерации 1-го и 2-го рода 0,061 и 0,023, достоверность результата 0,99 при доверительных интервалах 0,005.

Разработан способ генерации ключа длиной 48 бит на основе клавиатурного почерка субъекта, регистрируемого при вводе парольной фразы (либо 2-х реализаций фразы), на базе кодов БЧХ с применением процедуры оценки признаков по информативности индивидуально для каждого субъекта, вероятности ошибок генерации 1-го и 2-го рода составили:

- FRR=0,104 (из 2-х реализаций – FRR=0,064);
- если пароль неизвестен – FAR=0,009 (из 2-х реализаций – FAR=0,01);
- если пароль известен – FAR=0,021 (из 2-х реализаций – FAR=0,025).

Достоверность результата 0,99 при доверительных интервалах 0,02.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Managing cyber risks in an interconnected world. Key findings from The Global State of Information Security Survey 2015. PricewaterhouseCoopers. URL: http://www.pwc.ru/ru_RU/ru/riskassurance/publications/assets/managing-cyber risks.pdf.
2. Turnaround and transformation in cybersecurity. Key findings from The Global State of Information Security Survey 2016. PricewaterhouseCoopers. URL: <http://www.pwc.ru/ru/riskassurance/publications/assets/gsis2016-report.pdf>.
3. Teoh A., Kim J. Secure biometric template protection in fuzzy commitment scheme // IEICE Electron. Express. 2007. № 4 (23). P. 724–730.
4. Nandakumar K. A fingerprint cryptosystem based on minutiae phase spectrum // In Proc. of IEEE Workshop on Information Forensics and Security (WIFS), 2010. P. 1–6.
5. Hao F., Anderson R., Daugman J. Combining Cryptography with Biometrics Effectively // IEEE Transactions on Computers. 2006. № 55 (9). P. 1081–1088.
6. Bringer J., Chabanne H., Cohen G., Kindarji B., Z'émor G. Theoretical and practical boundaries of binary secure sketches // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2008. № 3. P. 673–683.
7. Rathgeb C., Uhl A. Adaptive fuzzy commitment scheme based on iris-code error analysis // In Proc. of the 2nd European Workshop on Visual Information Processing (EUVIP'10), 2010. P. 41–44.
8. Ao M., Li S. Z. Near infrared face based biometric key binding // In Proc. of the 3rd International Conference on Biometrics (ICB'09) LNCS: 5558, 2009. P. 376–385.

9. Kelkboom E. J. C., Zhou X., Breebaart J., Veldhuis R. N. S., Busch C. Multi-algorithm fusion with template protection // In Proc. of the 3rd IEEE Int. Conf. on Biometrics: Theory, applications and systems (BTAS'09), 2009. P. 1–7.
10. Maiorana E., Campisi P. Fuzzy commitment for function based signature template protection // IEEE Signal Processing Letters. 2010. № 17. P. 249–252.
11. Santos M. F., Aguilar J. F., Garcia J. O. Cryptographic key generation using handwritten signature // Proceedings of SPIE, Orlando, Fla, USA, Apr., 2006. Vol. 6202. P. 225–231.
12. Monroe F., Reiter M. K., Wetzel R. Password hardening based on keystroke dynamics // Proceedings of sixth ACM Conference on Computer and Communications Security. CCCS, 1999.
13. Monroe F., Reiter M. K., Li Q., Wetzel S. Cryptographic key generation from voice // Proceedings of the 2001 IEEE Symposium on Security and Privacy, 2001.
14. Sutcu Y., Li Q., Memon N. Secure biometric templates from fingerprint-face features // In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR '07, 2007. P. 1–6.
15. Nandakumar K., Jain A. K. Multibiometric template security using fuzzy vault // In IEEE 2nd International Conference on Biometrics: Theory, Applications, and Systems, BTAS '08, 2008. P. 1–6.
16. Paulo Henrique Pisani, Ana Carolina Lorena. A systematic review on keystroke dynamics // Journal of the Brazilian Computer Society. 2013. 19(4).
17. Lv H.-R., Wang W.-Y. Biologic verification based on pressure sensor keyboards and classifier fusion techniques // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2006. 52(3). P. 1057–1063.
18. Hidetoshi Nonaka, Masahito Kurihara. Sensing Pressure for Authentication System Using Keystroke Dynamics // International Journal of Computer, Control, Quantum and Information Engineering. 2007. Vol. 1. no. 1. URL: <http://waset.org/publications/2995/sensing-pressure-for-authentication-system-using-keystroke-dynamics>
19. Dodis Y., Reyzin L., Smith A. Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy Data // Proceedings from Advances in Cryptology. EuroCrypt, 2004. P. 79–100.
20. Robert H Morelos-Zaragoza. The art of error correcting coding. John Wiley & Sons, 2006. 320 p.
21. Scotti F., Cimato S., Gamassi M., Piuri V., Sassi R. Privacy-aware Biometrics: Design and Implementation of a Multimodal Verification System // 2008 Annual Computer Security Applications Conference, IEEE, 2008. P.130–139.
22. Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Volkov D. A. Application of noise tolerant code to biometric data to verify the authenticity of transmitting information / Control and Communications (SIBCON), 21-23 May. Omsk, 2015. P. 1–3.

УДК 004.056.53+004.93

МЕТОД ЗАЩИТЫ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ НА ЭЛЕКТРОННЫХ И БУМАЖНЫХ НОСИТЕЛЯХ
НА ОСНОВЕ СКРЫТОГО БИОМЕТРИЧЕСКОГО ИДЕНТИФИКАТОРА СУБЪЕКТА,
ПОЛУЧАЕМОГО ИЗ ПОДПИСИ

П. С. Ложников¹, А. Е. Сулавко¹, А. В. Еременко², Д. А. Волков¹

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Аннотация – Объектом исследования в статье выступают методы кодирования информации в текстовых контейнерах. Предложен метод встраивания в текстовый документ цифрового водяного знака, основанного на биометрических признаках автора документа. Определена информационная емкость, которая в отношении бит/символ составляет 0,02. Разработан способ проверки документов на электронных и бумажных носителях на предмет неправомерного изменения и их аутентичности.

Ключевые слова: биометрические признаки, защита интеллектуальной собственности, помехоустойчивое кодирование, цифровой водяной знак, стеганография.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационных сетей постепенно превращает мир в единое информационное и коммуникационное пространство, обостряя проблемы, связанные с защитой авторских прав. Помимо технической стороны вопроса защиты интеллектуальной собственности, актуальным остается вопрос законодательства. В настоящее время действие закона № 187-ФЗ распространяется только на фильмы, но от «пиратства» страдают и другие творческие деятели. За минувший год потери отрасли книгоиздания от интернет-пиратства составили 7,5 млрд

руб. [1]. Согласно прогнозу к 2015 году ущерб составил уже 30 млрд руб., а к 2018 году достигнет значения 70 млрд руб. [1]. Основным подходом к техническому решению проблемы нелегального копирования является добавление в каждую распространяемую копию скрытого идентификатора (водяного знака), позволяющего однозначно определить источник утечки. Технологии встраивания цифрового идентификатора разрабатывались для электронных документов. Однако при печати текстовых документов возникает проблема переноса скрытого идентификатора автора на бумагу. Цель работы: определить потенциал подписи субъекта для создания на ее основе скрытого биометрического идентификатора и разработать метод встраивания идентификатора в текстовые документы на электронных и бумажных носителях для подтверждения их целостности и аутентичности. Формирование цифровых водяных знаков (ЦВЗ) предлагается выполнять из динамических характеристик подписи – биометрических признаков автора произведения, крайне сложных для подделки.

II. СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЛЕГАЛЬНОГО КОПИРОВАНИЯ АВТОРСКИХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ

На сегодняшний день существует большое количество систем внедрения ЦВЗ в мультимедийную информацию. Менее проработанным является вопрос защиты текстовой информации при помощи внедрения ЦВЗ. В лингвистической стеганографии выделяют следующие направления: использование особенностей символов, кодирование смещением строк, кодирование смещением слов, синтаксические и семантические методы.

Исходя из постановки задачи, содержание текста после встраивания защитной метки не должно изменяться, так как должен быть сохранен авторский стиль произведения, в котором одинаковое значение имеют пунктуационные знаки и слова. Кодирование вертикальным смещением строк и горизонтальным смещением слов позволяет решить поставленную задачу, т.к. при таком подходе изменяется оформление документа, а не его содержательная часть. В настоящей работе с учетом опыта [2] проведено исследование вопроса генерации защитной метки и ее встраивания в различные участки текстового документа для обеспечения связи содержимого документа и идентификационных признаков подписи автора произведения.

В соответствии с предлагаемой технологией при завершении работы над текстом, автор произведения (текстового документа) его подписывает. В качестве подписи может быть использован не только автограф, но и текстовый пароль. Из образа подписи автора формируется криптографический ключ. Далее на основе хеша текста и ключа генерируется биометрический идентификатор (защитная метка), который с помощью методов стеганографии связывается непосредственно с содержимым документа с возможностью его восстановления для проверки авторства и целостности текста после печати.

III. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ ПОДПИСИ АВТОРОВ ТЕКСТОВЫХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ

Количество признаков, необходимое для успешного решения некоторой задачи генерации ключа, зависит от их информативности. В рамках предыдущих исследований авторами настоящей работы были апробированы различные виды ортогональных базисных функций для описания динамики подписи и оценена информативность признаков, получаемых на их основе [3, 4].

Для создания эталона подписи, пользователь несколько раз воспроизводит ее на графическом планшете. Из каждой реализации подписи вычисляются параметры, характеризующие внешний вид подписи: расстояния между координатами контурного образа, отношение длины к ширине, центр подписи, угол наклона и ее динамику: коэффициенты корреляции между функциями динамики подписи [4], коэффициенты вейвлет-преобразования [5] (в данной работе использовались вейвлеты Добеши D6 с различными уровнями разложения [6]). После этого производится расчет средних значений указанных параметров по всем реализациям [4]. Полученный вектор значений является эталоном подписи. Затем эталонные значения признаков округляются и представляются в виде последовательности m бит A_m .

IV. ВСТРАИВАНИЕ ЗАЩИТНОЙ МЕТКИ В ТЕКСТ ДОКУМЕНТА

Метод встраивания защитной метки в документ с помощью вертикального сдвига строк и горизонтального смещения слов описывается в [2]. В работе рассматриваются различные виды искажений в изображении документа (шум, перекося строк, растяжение и сжатие текста, размытость, случайный сдвиг и равномерное изменение интенсивности), возникающие при его ксерокопировании, сканировании и выводе на печать, и предложены способы компенсации данных искажений.

Изображение страницы может быть представлено в виде функции $f(x,y)=0$ или 1, $x \in [0,W]$, $y \in [0,L]$, где W и L – ширина и длина документа, зависящие от разрешения сканирующего устройства. Для простоты примем, что $x \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}$ и функция $f(x,y)$ принимает непрерывные значения. Изображение текстовой строки описывается функцией $f(x,y)=0$ или 1, $x \in [0,W]$, $y \in [t,b]$, где t и b – верхняя и нижняя границы строки.

Горизонтальное представление строки на изображении можно описать интегральной величиной $h(y)$, т.е. суммой всех интервалов, где функция $f(x,y)$ принимает ненулевые значения $h(y)=\int_0^W f(x,y)dx, y \in [t,b]$. Вертикальная область текстовой строки может быть представлена суммой интервалов в вертикальном направлении, где функция $f(x,y)$ принимает ненулевые значения $v(x)=\int_t^b f(x,y)dy, x \in [0,W]$.

Один бит сообщения может быть закодирован в тексте через смещение строки вверх или вниз по вертикали от стандартной позиции, определяемой межстрочным интервалом, заданным оформителем документа. При этом соседние строки предлагается использовать как контрольные и их положение не должно изменяться. Также для кодирования битов может использоваться сдвиг слова по горизонтали влево или вправо. Для этого в строке выделяют три группы слов: два слова по краям строки и оставшиеся слова между ними, объединенные в одну среднюю группу. Слова по краям строки рассматриваются как контрольные и их положение не должно изменяться по завершении операции кодирования. Таким образом, для описания процедуры кодирования можно оперировать единой моделью представления текста в виде блоков (см. рис. 1): средний блок используется для кодирования бита сообщения, крайние блоки являются контрольными и их положение не изменяется по завершении операции кодирования.



Рис. 1. Модель представления текста в виде блоков, использующихся для кодирования и декодирования битов сообщения

V. ПРИНЦИПЫ КОДИРОВАНИЯ ЗАЩИТНОЙ МЕТКИ

Процедура кодирования бит защитной метки в документе выглядит следующим образом:

1. В отличие от [2], где для кодирования бит сообщения предлагается использовать каждую вторую строку, соответствующую указанным выше условиям, в настоящей работе с целью увеличения емкости метода для кодирования выбираются строки, составляющие абзац, который является структурной единицей при форматировании документа (изменение межстрочного интервала применяется ко всем строкам, входящим в абзац). Положение первой и последней строк абзаца остается неизменным и используется для вычисления оригинального межстрочного интервала. При этом смещение выбранных для кодирования строк должно производиться в одном направлении применительно ко всему документу (либо вверх, либо вниз).

2. С целью увеличения емкости метода, в настоящей работе предлагается использовать все слова в строке за исключением первого и последнего, которые являются вспомогательными при определении оригинального расстояния между словами (до изменения их положения в строке). Смещение выбранных для кодирования слов также должно производиться в одном направлении (вправо или влево). Смещение означает 1, отсутствие смещения 0.

3. Защитная метка встраивается в каждую страницу документа. В зависимости от наполненности страницы текстом (емкости контейнера) производится формирование защитной метки с количеством бит $2n$ с соблюдением условия $2n \leq E$, где E – доступная для встраивания сообщения емкость контейнера, бит. При этом заполняется весь доступный объем контейнера.

4. Операция смещения строки является приоритетной перед операцией сдвига слова при кодировании очередного бита сообщения.

VI. ДЕКОДИРОВАНИЕ (СЧИТЫВАНИЕ) ЗАЩИТНОЙ МЕТКИ ИЗ ЦИФРОВОЙ КОПИИ ДОКУМЕНТА

После получения изображения документа в электронном виде производится декодирование защитной метки. Рассмотрим обобщенную модель, которая описывает оба способа кодирования бит сообщения. Модель представляет собой область $h(x)$, $x \in [b, e]$ (см. рис. 1), состоящую из трех блоков. В случае если кодирование производится смещением слов, то область $h(x)$ состоит из трех блоков слов, первый и последний из которых являются контрольными и их положение не изменяется. Если речь идет о кодировании идентификатора сдвигом строк, то $h(x)$ обозначает область, состоящую из трех блоков строк, первый и последний из которых являются контрольными и не изменяют своего положения по завершении операции кодирования.

Для определения смещения строк выполняется расчет центра тяжести каждого из трех блоков, входящих в область $h(x)$, определяемых соответственно тремя интервалами $[b_1, e_1]$, $[b_2, e_2]$ и $[b_3, e_3]$. Достаточно определить ординату центра тяжести каждого блока для проверки факта смещения строки. На следующем шаге по ординатам центров тяжести y_1 , y_2 и y_3 определяется расстояние между блоками. Признаком того, что строка сдвинута вверх, является выполнение неравенства $|y_2 - y_1| < |(y_3 - y_1)/2|$. Выполнение неравенства $|y_2 - y_1| > |(y_3 - y_1)/2|$ означает, что строка смещена вниз.

Пусть мы имеем область $h(x)$ и три интервала $[b_1, e_1]$, $[b_2, e_2]$ и $[b_3, e_3]$, которые определяют три группы слов. Полагаем, что $h(x) = 0$ в интервалах между группами слов. Средняя группа используется для кодирования сообщения в тексте, в то время как положения крайних слов остаются неизменными.

Определим область, описывающую строку со сдвигом центрального блока влево $h(x)$, как систему неравенств:

$$h(x), x < b_2 - \epsilon \text{ или } x > e_2,$$

$$h(x+s), b_2 - \epsilon \leq x \leq e_2 - \epsilon,$$

$$0, e_2 - \epsilon \leq x < e_2.$$

После сдвига центрального блока вправо $h^r(x)$ система неравенств описывает новую область, получившуюся из $h(x)$:

$$h(x), x < b_2 \text{ или } x > e_2 + \epsilon,$$

$$0, b_2 \leq x < b_2 + \epsilon,$$

$$h(x-s), b_2 + \epsilon \leq x \leq e_2 + \epsilon,$$

где ϵ – величина сдвига, не превышающая половины расстояния между словами.

Обозначим за $h'(x)$ область строки, полученную после оцифровывания документа. Чтобы определить направление смещения средней группы слов вычислим сумму:

$$\sum_{b_1}^{e_3} h'(x)(h^l(x) - h^r(x)) \geq 0.$$

Положительный либо равный нулю результат означает, что средняя группа слов была сдвинута влево, т.е. область $h'(x)$ в большей степени совпала с описанием $h^l(x)$ и вправо в противном случае. Независимо от примененного типа выравнивания абзаца можно определить положение каждого слова в строке относительно первого и последнего слова. На следующем шаге определяется фактическое положение слов в строке, после чего происходит декодирование содержимого.

VII. ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ЕМКОСТИ МЕТОДА И КОНТЕЙНЕРА

Одним из вопросов, который необходимо исследовать в настоящей работе, является определение зависимости сложности криптографического ключа (его надежности) и емкости текста, в который данный ключ может быть встроен.

При разработке системы защиты текстовых документов на электронных и бумажных носителях необходимо учитывать емкость контейнера. В сопроводительной документации к большинству известных программ по стеганографии говорится, что для сокрытия информации объём памяти файла-контейнера должен примерно в восемь раз превышать объём памяти информационного файла. Но если рассмотреть методы сокрытия информации в тексте, то становится очевидным, что объём памяти файла-контейнера должен в 50–200 раз превышать объём памяти информационного файла.

Эффективность методов встраивания дополнительной информации в скрывающие данные (контейнеры) определяется информационной емкостью метода. Произведен расчет на основании оценок лингвистов: средняя длина слова на корпусе текстов частотного словаря Ляшевской О.Н. и Шарова С.А. составляет 5,28 символа и размера условно-стандартной (учётной) страницы формата А4 равен 1800 знакам с пробелами.

Информационная емкость метода в отношении бит/символ составляет 0,02, что соответствует эффективности использования контейнера на 2% (1 бит на 48 бит 6–символьного слова). Для сравнения: эффективность использования контейнера методом, основанным на использовании синонимов, при искусственной генерации текстов, не превышает 11% в отношении бит/символ. Примерно той же эффективностью обладают и методы, основанные на использовании пробельных символов и знаков пунктуации.

VIII. ГЕНЕРАЦИЯ ЗАЩИТНОЙ МЕТКИ И ПРОВЕРКА АВТОРСТВА ДОКУМЕНТА

Структура внедряемой маркировки определяется постановкой задачи защиты электронного документа. Были выделены следующие части данной задачи:

- защита документа и его частей от подделки;
- проверка авторства документа.

Для решения этих задач было решено внедрять в документы следующую информацию:

- идентификатор автора текстового документа, связанный с биометрическими характеристиками его подписи;
- значение хеш-функции от содержимого документа.

Из этих требований и из описанного выше способа сокрытия информации было принято решение о целесообразности внедрения маркировки в каждую страницу текстового документа. Кроме того, из-за необходимости проверки наличия изменений в документе, следует привязывать маркировку не только к ключу, получаемому из биометрических характеристик подписи автора документа, но и к самому контейнеру.

После подготовки произведения автор подписывает документ. Вычисляются статические и динамические признаки подписи автора документа, оценивается информативность каждого признака. Выработка защитной метки проводится постранично, для этого текст с каждой страницы загружается в буфер. Учитывая требование распределения данных скрытой маркировки по всему документу, а также необходимость проверки маркировки по каждой малой части документа отдельно, алгоритм встраивания маркировки должен включать в себя следующие основные шаги:

1. Производится оценка информационной емкости текстового контейнера описанным ранее способом.

2. С помощью псевдослучайного генератора вырабатывают ключевую последовательность Key равную m бит. Биометрический идентификатор автора не может быть непосредственно использован для шифрования текстовой строки, так как значения биометрических признаков даже при последовательном вводе нескольких реализаций будут иметь определенный разброс. Ключевая последовательность кодируется помехоустойчивым кодом, после чего с помощью операции побитового сложения по модулю 2 с биометрическими данными автора получают открытую строку. Ключ после защиты документа уничтожается. Открытую строку, описание произведения и его автора сохраняют на специализированном сервере.

3. Для получения биометрического идентификатора (защитной метки) используется n битовая хеш-функция двух аргументов. На вход хеш-функции подают выбранную для маркировки текстовую строку и сгенерированную ключевую последовательность. На первом шаге текстовая строка и ключевая последовательность подаются на вход байтового сумматора хеш-функции в байтовом представлении [7]. Байтовый сумматор может быть представлен функцией битового сложения по модулю два (операция XOR) при достаточной длине ключевой последовательности или функцией поточного шифрования текстовой строки на ключе Key. В реализации байтового сумматора с использованием функции битового сложения по модулю два каждый бит байта текстовой последовательности складывается по модулю два с соответствующим битом ключевой последовательности. С выхода байтового сумматора биты последовательно подают на вход регистра сдвига $R \rightarrow$ с линейной обратной связью [7]. Выбор конкретного примитивного многочлена для регистра сдвига может быть произвольным, в нашем случае выбран многочлен: $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ [7].

Биты с выхода регистра сдвига подают во временный буфер W , реализующий хранение последних $2n$ поступивших в него битов (исходя из условия $2n \leq E$, где $2n$ – длина ключа, E – информационной емкости контейнера). По завершении циклической обработки всех битов последовательности, полученной от исходной текстовой строки с выхода байтового сумматора, последние $2n$ битов с выхода регистра сдвига $R \rightarrow$, оставшиеся в буфере W , и формируют результат хеш-функции. Альтернативно можно использовать любую из широко распространенных, проверенных хеш-функций одного аргумента, например, функцию SHA-256, подавая ей на вход результат гаммирования двух аргументов.

Для проверки авторства текста субъект, заявляющий данное право расписывается на графическом планшете. Полученные на основании его подписи биометрические признаки используются для извлечения криптографического ключа из открытой строки (при помощи операции сложения по модулю 2 и последующего применения кода, исправляющего ошибки), хранящейся на сервере. Вычисляется значение хеш-функции от текстовой строки и полученного криптографического ключа способом, описанным выше. Выполняется декодирование защитной метки, содержащейся в тексте и ее сравнение с вычисленной меткой на основании предъявленных данных. При совпадении защитных меток, авторство считается подтвержденным, а содержание документа неизменным.

Для определения связи криптостойкости ключа длиной m бит и надежности его восстановления из открытой строки, хранящейся на сервере, был проведен вычислительный эксперимент с использованием предложенного способа восстановления ключа, который заключается в следующем. Предварительно исходные значения признаков кодируются при помощи преобразования вида: $y=f(x)$, где $x \in X$, X – множество возможных значений признака, $y \in \{0, 1, 3, 7, 15, 31, 63, 127, 255, 254, 252, 248, 240, 224, 192, 128\}$. Выходное значение y представляется в двоичном виде. Это производится для того, чтобы исключить неинформативные биты данных. Далее производится «склейка» битовых последовательностей в одну результирующую, которая «объединяется» со случайной строкой. В работе [8] показана связь эффективности коррекции ошибок с методами группирования битов с разной вероятностью единичной ошибки. Несмотря на предпринятые в данном направлении усилия, единого подхода для решения этого вопроса до сих пор выработано не было. В настоящей работе предпринята попытка развития данного направления по модернизации нечетких экстракторов. Последовательность признаков задается случайным образом для каждого субъекта индивидуально во время формирования открытой стро-

ки. Осуществляется конкатенация битовых представлений только наиболее информативных (стабильных) признаков для субъекта. Для каждого признака по всем отобраным для создания эталона преобразованным реализациям вычисляется относительная частота появления единичных бит. Далее определяется интегральная оценка стабильности бит во всех разрядах, как произведение относительных частот появления единичных и нулевых бит. Чем больше разрядов будет иметь частоты, близкие к 0 или 1, тем меньше получится итоговое произведение и тем выше интегральная оценка стабильности (информативности) признака для субъекта. Далее все признаки ранжируются по информативности (изменяется их порядок – от самого стабильного к самому нестабильному) и отбирается определенное количество признаков, производится конкатенация битовых представлений этих признаков, остальные отбрасываются. Чем больше используется признаков – тем выше длина ключа, но и выше сумма ошибок 1-го и 2-го рода. Итоговая битовая последовательность используется для формирования открытой строки.

Для кодирования битовой последовательности Key в предложенном методе использовались коды, исправляющие ошибки, БЧХ (Боуза – Чоудхури – Хоквингема). Для декодирования – алгоритм Питерсона – Горенштейна – Цирлера (ПГЦ).

Результат эксперимента составляет: вероятности ошибок выработки идентификатора 1-го рода от 0,008 до 0,064 и 2-го рода от 0,03 до 0,01 при длине криптографического ключа от 64 до 328 бит соответственно. Полученный результат указан для оптимальной исправляющей способности кода (при которой сумма ошибок первого и второго рода восстановления ключа была наименьшей при заданном количестве признаков), вычисляемой в процессе эксперимента. Достоверность указанных результатов составляет более 0,98 при доверительном интервале вероятности ошибок 1-го (FRR) и 2-го рода (FAR) 0,01 и 0,002 соответственно, что определялось исходя из экспериментально полученных вероятностей и количества проведенных опытов (8000). Количество испытуемых было равным 200.

Перед встраиванием защитной метки в текст документа для компенсации возможных ошибок на этапе ее извлечения, связанных с искажением изображения, целесообразно выполнять помехоустойчивое кодирование защитной метки. Следует учитывать, что данная операция увеличит размер защитной метки в несколько раз, что повлечет за собой необходимость использования хеш-функции, возвращающей значение меньшей разрядности из-за ограничения информационной емкости контейнера. Если объема текста на странице недостаточно для внедрения значения хеш-функции, то он может быть «присоединен» к содержанию предыдущей или последующей страницы.

IX. ВЫВОДЫ

Разработан метод генерации идентификатора автора на основе содержимого документа и биометрических характеристик подписи его владельца с вероятностью ошибок выработки идентификатора 1-го рода от 0,008 до 0,064 и 2-го рода от 0,03 до 0,01 при длине криптографического ключа от 64 до 328 бит соответственно. В качестве способа встраивания защитной метки в документ с учетом поставленной задачи выбрано кодирование битов сообщения смещением слов и строк. Способ обеспечивает скрытность и устойчивость встраиваемого сообщения для определения целостности и аутентичности документа как на электронном, так и бумажном носителях с соотношением количества скрываемой информации к объему контейнера порядка 1–1,5%. Информационная емкость предложенного метода достаточна для решения поставленной в работе задачи – защиты документа от незаконного копирования и изменения содержимого. Защитная метка может внедряться непосредственно в сам документ, поддерживающий форматирование текста, либо изменения в формате производятся непосредственно при выводе документа на печать.

Для подавления шумов, возникающих при получении цифровой копии документа, перед выполнением процедуры декодирования сообщения следует применять известные методики, описанные в открытой литературе, например, эффективным способом подавления шума типа «salt and pepper» является медианный фильтр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorovcova M. Novaja "antipiratskaja" iniciativa: okazhutsja li pod zashhitoj vse ob#ekty avtorskih prav GARANT.RU [The new "anti-piracy" Initiative: will be all objects under the protection of copyright GARANT.RU]. URL: <http://www.garant.ru/article/501059/#ixzz3PHwgpwoV> (Date of circulation: 01.15.2015).
2. Brassil J., Low S., Maxemchuk N., O'Gorman L. Document marking and identification using both line and word shifting // Technical report, AT&T Bell Laboratories, 1994. P. 853–860.
3. Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Samotuga A. E. Personal Identification and the Assessment of the Psychophysiological State While Writing a Signature. Information. 2015. № 6. P. 454–466.

4. Lozhnikov P. S., Sulavko, A. E., Volkov D. A. Application of noise tolerant code to biometric data to verify the authenticity of transmitting information // Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015. Omsk, 2015. P. 1–3.
5. Balakin A. V., Eliseev A. S., Gufan A. Ju. Ispol'zovanie steganograficheskikh metodov dlja zashhity tekstovoj informacii [Using steganography techniques to protect the textual information] // T-Comm. 2009. April. P. 42–50.
6. Deng P. S., M. Liao H.-Y., Ho C. W., Tyan H.-R. Wavelet-based offline handwritten signature verification // Comput. Vis. Image Underst. 1999. Vol. 76, no. 3, P. 173–190.
7. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Philadelphia: S.I.A.M., 1992.
8. Santos M. F., Aguilar J. F., Garcia J. O. Cryptographic key generation using handwritten signature // Proceedings of SPIE, Orlando, Fla, USA, Apr. 2006, 2006. Vol. 6202. P. 225–231.

УДК 519.688

КОМБИНИРОВАННАЯ АТАКА НА АЛГОРИТМ RSA С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SAT-ПОДХОДА

Ю. Ю. Огородников

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В статье рассматривается криптоанализ задачи факторизации целых чисел, на вычислительной сложности которой основан широко распространённый алгоритм шифрования и цифровой подписи RSA. Факторизация сводится к задаче выполнимости булевых формул (SAT), часть решения которой однозначно соответствует битам сомножителей. К задаче SAT применяется метод простой итерации и ряд полиномиальных эвристик по улучшению его сходимости. Также описано применение альтернативного способа решения SAT, заключающегося в построении системы линейных уравнений на основе исходной формулы. По результатам численных экспериментов формируется статистика по верному определению каждой компоненты решения SAT. Максимальная доля верно определённых нулевых и единичных бит составляет 94% и 82% соответственно. Полученные данные используются в сочетании с известным алгоритмом локального поиска GSAT для проведения атаки на RSA. В результате экспериментов удалось факторизовать числа размерностей до 417 бит включительно.

Ключевые слова: факторизация целых чисел, задача выполнимости булевых формул (SAT), метод простой итерации, частоты верного определения бит, гибридный алгоритм, комбинированная атака RSA.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко распространены как симметричные, так и асимметричные алгоритмы шифрования. Если с помощью первых, таких как DES, AES, проводится шифрование/дешифрование основных данных, то с помощью другого типа алгоритмов шифруется в основном вспомогательная, но важная информация – ключ для симметричного шифрования. Самой известной и широко- распространённой асимметричной криптосистемой является, пожалуй, алгоритм RSA.

Популярность данного алгоритма привлекает учёных из разных сфер деятельности. Так, криптоаналитики уже в течение многих лет исследуют криптостойкость данного алгоритма путём моделирования различных атак на RSA [1]. Атаки проводятся как непосредственно на схему шифрования, так и на фундаментальную задачу факторизации целых чисел, на вычислительной сложности которой и основан RSA.

На сегодняшний день группе учёных из Швейцарии, Японии, Франции, Нидерландов, Германии и США удалось факторизовать число размерностью 768 бит [2]. Данный алгоритм работает на основе общего метода решета числового поля, и исследователи утверждают, что через несколько лет смогут разложить число размерностью 1024 бита. Однако на текущий момент 768 бит остаётся максимальной размерностью, поддающейся разложению. Тем самым, увеличение размерности ключа до 1024, и тем более до 2048 бит принципиально решает вопрос о невозможности дешифровки стандартными способами, к которым относится, в частности, метод решета числового поля.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Автор статьи предлагает другой подход к решению задачи факторизации. Суть его заключается в построении алгоритма, решающего задачу факторизации «не до конца», но при этом в результате статистических ис-

пытаний для каждого бита будет получена вероятность верного определения каждого бита. Таким образом, этот алгоритм будет являться *вероятностным* [3].

Наиболее популярным подходом является полиномиальное сведение задачи поиска выполняющего набора булевых формул (SAT) к факторизации целых чисел через кодирование операции умножения двух чисел столбиком в терминах булевой алгебры [4].

Относительно новым подходом к конструированию SAT-solver является разработка алгоритма обучения с учителем, в результате работы которого каждому биту выполняющего набора y_i будет сопоставлено вещественное число V_i из диапазона $[0..1]$, характеризующее частоту верного распознавания y_i . Таким образом, полученные данные смогут быть применены за полиномиальное время к задаче факторизации целых чисел.

Для улучшения результатов предполагается использование нескольких независимых способов определения частот бит. Каждый алгоритм выполняется в отдельном модуле и не пересекается с другими.

Реализация данного разбиения выполнена с использованием технологии MPI. Получившийся программный комплекс работает в двух режимах — режиме обучения и рабочем режиме. В первом режиме проводится формирование статистики верного определения бит каждым из алгоритмов (при этом необходимо знание точного решения для получения частот верного определения бит), во втором же режиме статистические данные используются для составления нового приближения путём разбиения бит на 4 группы методом кластерного анализа. К получившимся группам применяется один из представленных 4-х алгоритмов в зависимости от специфики разбиения.

В свою очередь, частоты, полученные гибридным алгоритмом, могут быть применены в сочетании с известными решателями SAT (в качестве такого может быть взят, к примеру, GSAT). Таким образом, возможно проведение *комбинированной* атаки на задачу факторизации целых чисел и, соответственно, на алгоритм RSA.

III. ТЕОРИЯ

Пусть на множестве переменных $y = (y_1, y_2 \dots y_n) \in B^n$ задана формула

$$L^*(y) = G_1^*(y) \wedge G_2^*(y) \wedge \dots \wedge G_M^*(y) \tag{1}$$

$$G_i^*(y) = \bigvee_j y_j^\sigma, \sigma \in \{0,1\}.$$

Производится переход от 3-КНФ к 3-ДНФ

$$L(y) = \overline{L^*(y)} = G_1(y) \vee G_2(y) \vee \dots \vee G_M(y) \tag{2}$$

$$G_i(y) = \bigwedge_j y_j^\sigma, \sigma \in \{0,1\}.$$

Булевым переменным сопоставляются вещественные по правилам

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{если } y_j = true \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \tag{3}$$

Форме $L(y)$ соотносится функционал $F : [0,1]^n \rightarrow R_+$ вида:

$$F(x) = \sum_{i=1}^M C_i(x) \tag{4}$$

$$C_i(x) = \prod_{j=1}^N p_{i,j}(x)$$

$$p_{i,j}(x) = \begin{cases} x_j^2, & \text{если } y_j^\sigma, \sigma = 1 \\ (1 - x_j)^2, & \text{если } y_j^\sigma = 0 \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}$$

Известно, что минимум функционала (4) соответствует выполняющему набору формулы (1).

Функционал (4) дифференцируется по переменным $x_i \quad \forall i = 1..N$, и его частные производные приравняются к нулю, тем самым получается система нелинейных уравнений

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = 0. \quad (5)$$

К полученной системе применяется метод простой итерации [5]. Вычисления основаны на схеме Гаусса–Зейделя (6), согласно которой для вычисления компонент приближения на $k + 1$ -й итерации используются данные, полученные на предыдущей итерации. Выбор данной схемы обусловлен тем, что метод ближе подбегает к окрестности точного решения, нежели метод Якоби [6]

$$x_i^{(k)} = \Phi(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_{i-1}^{(k)}, x_i^{(k-1)}, \dots, x_n^{(k-1)}) \quad (6)$$

Численные эксперименты показали, что метод будет сходиться к седловой точке-оврагу за определённое число итераций. Для преодоления овраговой ситуации применяется сегментный генетический алгоритм, для которого в качестве стартовой популяции берётся приближение, соответствующее оврагу $x^{(L)}$ и близлежащие вектора, норма отклонения которых не превышает заданное $\varepsilon = 0.1$. В результате применения генетического алгоритма наилучшая “особь” будет использована как стартовое приближение для нового запуска метода простой итерации [6].

Проецирование вещественных переменных в булевы

Другая модификация метода простой итерации связана с проецированием вещественных переменных в булевы. Если в обратном направлении проецирование проводится однозначно, то в данном случае возможно использование множества различных вариантов. Ниже приведён один из наиболее нетривиальных, связанный с применением байесовского классификатора [8].

Пусть $x^{(t)}$ – вектор-приближение, сформированный на t -й итерации. Тогда $x_i^{(t)}$ – i -й бит вектора-приближения. Пусть имеются два класса $\Omega_0 = \{x_i^{(t)} = 0\}$ и $\Omega_1 = \{x_i^{(t)} = 1\}$. Очевидно, что эти классы не пересекаются и образуют полное пространство классов $\Omega = \Omega_0 \cup \Omega_1$. Пусть также имеются два события: $H_i^0 = \{x_i^{(t)} \in \Omega_0\}$ и $H_i^1 = \{x_i^{(t)} \in \Omega_1\}$. Эти события являются гипотезами и состоят в том, что i -й бит вектора-приближения принадлежит к классам Ω_0 и Ω_1 .

Пусть $A_i^{(t)}$ – событие, состоящее в том, что i -й бит вектора-приближения определен верно, т.е. совпадает с точным решением. Тогда $P(A_i^{(t)})$ – вероятность этого события.

По формуле полной вероятности получается: $P(A_i^{(t)}) = P(H_i^0) * P(A_i^{(t)} | H_i^0) + P(H_i^1) * P(A_i^{(t)} | H_i^1)$. Здесь $P(A_i^{(t)} | H_i^0)$ – вероятность верного определения i -го бита при условии, что он отнесен к классу Ω_0 (другими словами, распознан как нулевой бит). Соответственно, $P(A_i^{(t)} | H_i^1)$ – вероятность верного определения i -го бита при распознавании его как единичного. По формуле Байеса:

$$P(H_i^0 | A_i^{(t)}) = \frac{P(H_i^0) * P(A_i^{(t)} | H_i^0)}{P(A_i^{(t)})} \quad (7)$$

$$P(H_i^1 | A_i^{(t)}) = \frac{P(H_i^1) * P(A_i^{(t)} | H_i^1)}{P(A_i^{(t)})},$$

$P(H_i^0 | A_i^{(t)})$ и $P(H_i^1 | A_i^{(t)})$ – вероятности верного отнесения бита $x_i^{(t)}$ к классам Ω_0 и Ω_1 при условии, что $x_i^{(t)}$ – верно определён. Именно на данных апостериорных вероятностях вычисляются параметры проецирования. Для успешного их вычисления требуется знание четырех вероятностей: $P(H_i^0)$, $P(H_i^1)$, $P(A_i^{(t)} | H_i^0)$, $P(A_i^{(t)} | H_i^1)$.

Вероятности $P(H_i^0)$ и $P(H_i^1)$ – безусловные. Изначально они задаются эвристически, например, можно взять $P(H_i^0) = 0.6$ и $P(H_i^1) = 0.4$. В процессе выполнения метода простой итерации вероятности $P(H_i^0)$ и $P(H_i^1)$ пересчитываются в зависимости от значения переменной $x_i^{(t)}$ и параметра проецирования θ .

$$\begin{aligned} P(H_i^0) &= x_i^{(t)}, \quad \text{если } x_i^{(t)} \leq \theta \\ P(H_i^0) &= 1 - x_i^{(t)}, \quad \text{если } x_i^{(t)} > \theta \\ P(H_i^1) &= 1 - x_i^{(t)}, \quad \text{если } x_i^{(t)} \leq \theta \\ P(H_i^1) &= x_i^{(t)}, \quad \text{если } x_i^{(t)} > \theta \end{aligned} \quad (8)$$

Вероятности $P(A_i^{(t)} | H_i^0)$ и $P(A_i^{(t)} | H_i^1)$ – априорные. Они могут быть получены на основании статистических испытаний обыкновенного метода простой итерации.

Таким образом, после каждой итерации метода последовательных приближений происходит вычисление апостериорных вероятностей по формулам (7). В зависимости от того, какая вероятность окажется больше, происходит проецирование либо в 0, либо в 1.

Изменение порядка вычисления переменных в методе простой итерации

Рассмотрим ещё одну модификацию метода простой итерации. Выше было упомянуто, что траектория метода простой итерации ведёт в седловую точку-овраг $x^{(L)}$, для преодоления которой применяют различные эвристические методы. Однако из полученного приближения $x^{(L)}$ можно извлечь информацию о совпадении с точным $x^{(*)}$. На основании достаточной тестовой выборки (1000 экземпляров задачи SAT) становится возможным определить для каждого бита y_i частоту совпадения ν_i с соответствующей компонентной точного решения y_i^* . Представляется логичным сконструировать модификацию, позволяющую повысить число бит с высокой частотой $\nu_i \geq 0.7$. Суть её заключается в изменении порядка вычисления переменных [8]. Для этого берётся перестановка σ на множестве действительных чисел $[1.. N]$, где N – число переменных в КНФ.

С помощью σ вычисляется новый порядок обхода переменных. Численные эксперименты показали, что в данном случае метод также ведёт в овраг, однако это уже будет другая точка оврага. Проанализировав её, можно также выделить компоненты, совпадающие с точным решением.

После выполнения метода простой итерации для N_σ перестановок формируется N_σ множеств частот по верному определению бит. Полученные данные могут быть использованы для составления компонент нового приближённого решения по формуле

$$\tilde{x}_i = \begin{cases} 1, & \frac{1}{N_\sigma} \left(\sum_{j=1}^{N_\sigma} \nu_{j_i}^1 - \sum_{j=1}^{N_\sigma} \nu_{j_i}^0 \right) > 0. \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (9)$$

В формуле (9) $\nu_{j_i}^1$ обозначает частоту верного определения единичного бита под номером i , которая была определена перестановкой с номером j . Обозначение $\nu_{j_i}^0$ имеет аналогичный смысл только для нулевых бит.

Сведение SAT к системе линейных уравнений

Для повышения частот верного определения бит возможно использование дополнительного метода получения приближённого решения SAT [8].

Пусть имеется КНФ вида

$$L(y) = \bigwedge_{i=1}^M C_i, \quad (10)$$

где C_i есть дизъюнкция вида $\vee y_j^\sigma, \sigma \in \{0,1\}$. Каждой дизъюнкции можно поставить в соответствие число f_i , равное количеству литералов, принимающих значение *true*.

Так, для 3-КНФ, ассоциированных с задачей факторизацией целых чисел, f_i может принимать значения 1,2,3. Значение 1 может быть в 3-х случаях, значение 2 также в 3-х случаях, а $f_i = 3$ может быть только в одном случае. Теоретически значение 0 также может приниматься, однако это будет означать, что для 3-КНФ выполняющего набора не существует, а для задачи факторизации это совершенно не так.

Математическое ожидание f_i равняется $\frac{3}{7} * 1 + \frac{3}{7} * 2 + \frac{1}{7} * 3 = \frac{12}{7}$. Это число заключено в интервале (1.5, 2), и ближайшее целое число – 2, поэтому можно сделать предположение, что числа f_i принимают значение 2.

Следующим шагом является построение системы линейных уравнений вида

$$Bx = g . \tag{11}$$

Квадратная матрица B формируется путём рассмотрения попарных сочетаний литералов $y_i^{\sigma_i}$ и $y_j^{\sigma_j}$ для каждого дизъюнкта C_k и добавления к соответствующему элементу b_{ij} произведения знаков рассматриваемых литералов. К примеру, для дизъюнкта $(y_1 \vee \bar{y}_2 \vee y_3)$ будет произведено 9 операций внесения элементов: $b_{11} \rightarrow +1, b_{12} \rightarrow -1, b_{13} \rightarrow +1, b_{22} \rightarrow +1$ и так далее. Стоит отметить, что изначально матрица B и столбец g инициализированы нулями. Сформированная таким образом матрица будет обладать диагональным преобладанием и является сильно разреженной (справедливо для 3-КНФ, ассоциированных с задачей факторизации).

Столбец g формируется синхронно с построением матрицы B путём проведения операций с числами $f_i = 2$. При этом к элементу g_k прибавляется значение $sign(y_i^{\sigma_i}) * sign(y_j^{\sigma_j}) * f_i$, где $sign$ – функция, возвращающая знак литерала (1 для позитивного литерала и -1 для негативного).

К сформированной таким образом системе применяется метод Гаусса–Зейделя со стартовым приближением $x^{(0)} = (0,0...0)$. Полученное вещественное приближение проецируется в вещественное по правилам

$$y_i = \begin{cases} false, & |x_i| < 0.1 \\ true, & иначе \end{cases} \tag{12}$$

Гибридный алгоритм поиска приближённого решения SAT

Выше были описаны 4 эвристических алгоритма, в результате статистических испытаний которых возможно получение частот по верному определению бит. Полученные результаты могут быть использованы как отдельно сами по себе, так и в сочетании друг с другом. Во втором случае требуется предварительное разбиения множества бит на 4 кластера (по числу алгоритмов), используя множества частот, полученные в результате статистических испытаний всех 4-х алгоритмов. Идея разбиения состоит в том, что биты, входящие в один кластер, идеально обрабатываются алгоритмом, ассоциированным с данным кластером (т.е. с частотой 1 или 0) и неоднозначно определяются другими алгоритмами (с частотой ≈ 0.5). Понятно, что на практике такое требование практически не достижимо, однако позволяет в некотором роде приблизиться к оптимальному варианту. Разбиение проводится одним из самых распространённых алгоритмов – методом $k - means$. Стартовые значения кластеров инициализируются как $C_1(1.0;0.0;0.0;0.0), C_2(0.0;1.0;0.0;0.0), C_3(0.0;0.0;1.0;0.0), C_4(0.0;0.0;0.0;1.0)$. Первый кластер соответствует методу простой итерации с генетическим алгоритмом, второй – байесовскому проецированию, третий – изменению порядка вычислений переменных, четвёртый – построению и решению системы линейных уравнений. Ниже приведён псевдокод алгоритма.

Алгоритм 1. Разбиение бит на кластеры.

Вход: Множества частот V_1, V_2, V_3, V_4 , полученные разработанными алгоритмами.

Шаг 1. Ввести начальные центры кластеров $C_1^{(0)}(1.0;0.0;0.0;0.0), C_2^{(0)}(0.0;1.0;0.0;0.0), C_3^{(0)}(0.0;0.0;1.0;0.0), C_4^{(0)}(0.0;0.0;0.0;1.0)$.

Шаг 2. Положить $k = 1$.

Шаг 3. Каждому биту y_i сопоставить вектор $\tilde{v}_i = (V_1[i], V_2[i], V_3[i], V_4[i])$.

Шаг 4. Для каждого бита y_i и каждого кластера $C_j^{(k)}$ вычислить $\rho(\tilde{v}_i, C_j^{(k)}) = |C_j^{(k)} - \tilde{v}_i|$.

Шаг 5. Отнести y_i к тому кластеру $C_j^{(k)}$, для которого величина $\rho(\tilde{v}_i, C_j^{(k)})$ минимальна,

Шаг 6. Пересчитать координаты $C_1^{(k)}, C_2^{(k)}, C_3^{(k)}, C_4^{(k)}$.

Шаг 7. Проверить выполнение условия $\sum_j (|C_j^{(k)} - C_j^{(k-1)}|) < \varepsilon$. Если условие выполняется, то разбиение

окончено. Если нет, то положить $k = k + 1$ и перейти шагу 2.

Выход: *FRAGMENTATION* — разбиение на 4 кластера.

Конец алгоритма 1.

Само по себе разбиение *FRAGMENTATION* представляет собой массив, i -й элемент которого хранит номер кластера, к которому относится принадлежит y_i . Ниже приведён псевдокод гибридного алгоритма, использующего разбиение *FRAGMENTATION*.

Алгоритм 2. Гибридный алгоритм поиска приближённого решения SAT.

Вход: Массив *FRAGMENTATION*, хранящий разбиение бит на кластеры.

Шаг 1. Выполнить вышеописанные 4 алгоритма. Полученные приближения обозначить $S_j = 1..4$.

Шаг 2. Пусть S – приближение гибридного метода. Для каждого бита $i = 1..N$ выполнить: выбрать приближение S_j по номеру кластера *FRAGMENTATION*[i] и положить $S[i] = S_j[i]$.

Выход: S – приближение, сформированное гибридным алгоритмом.

Конец алгоритма 2.

Шаг 2 приведённого алгоритма требует пояснений. Пусть, к примеру, бит с номером $i = 0$ отнесён к первому кластеру. Тогда следует выбрать приближение, сформированное методом простой итерации с генетическим алгоритмом, и положить $S[0] = S_1[0]$. Аналогичная процедура проделывается для всех остальных бит.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для каждого метода было сгенерировано 1000 экземпляров задачи SAT, эквивалентной задаче факторизации целых чисел различных размерностей, полученных с помощью генератора КНФ, принцип работы которого описан в статье [4]. После завершения работы методов полученные приближения сравниваются с известным точным решением-эталоном на предмет совпадения бит. Отдельно подсчитываются доли верно определённых бит среди нулевых, единичных, а также общего числа бит.

Для гибридного алгоритма производятся те же самые действия, что и для составляющих методов. В табл. 1 приведены данные по долям верно распознанных бит для булевых формул, эквивалентных задачам факторизации чисел различных размерностей.

ТАБЛИЦА 1

ДОЛИ ВЕРНО ОПРЕДЕЛЁННЫХ БИТ ГИБРИДНЫМ АЛГОРИТМОМ

Размер факторизуемого числа	Доля верно определённых нулевых бит	Доля верно определённых единичных бит	Доля общего числа верно определённых бит
48	0.94	0.82	0.88
64	0.92	0.795	0.86
100	0.912	0.76	0.847
200	0.895	0.745	0.839
300	0.883	0.725	0.839
400	0.885	0.745	0.824
500	0.872	0.73	0.815
600	0.865	0.735	0.805
1024	0.865	0.73	0.77
2048	0.83	0.68	0.73

Выбранный доверительный интервал для результатов эксперимента $\gamma = 0.1$, стандартное отклонение для $N_{t_0} \sigma_{t_0} = 0.08$, для $N_{t_1} \sigma_{t_1} = 0.04$, для $N_t \sigma_t = 0.05$.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 приведена гистограмма по верному определению бит. Красный столбец соответствует числу верно определённых нулевых бит N_{t_0} , синий – единичным N_{t_1} , а белый столбец иллюстрирует общее число верно определённых бит N_t . Прослеживается небольшое снижение доли верно определённых бит с увеличением размерности задачи. Максимальная доля верно определённых нулевых бит – 94%, единичных – 82%, общего числа – 88%.

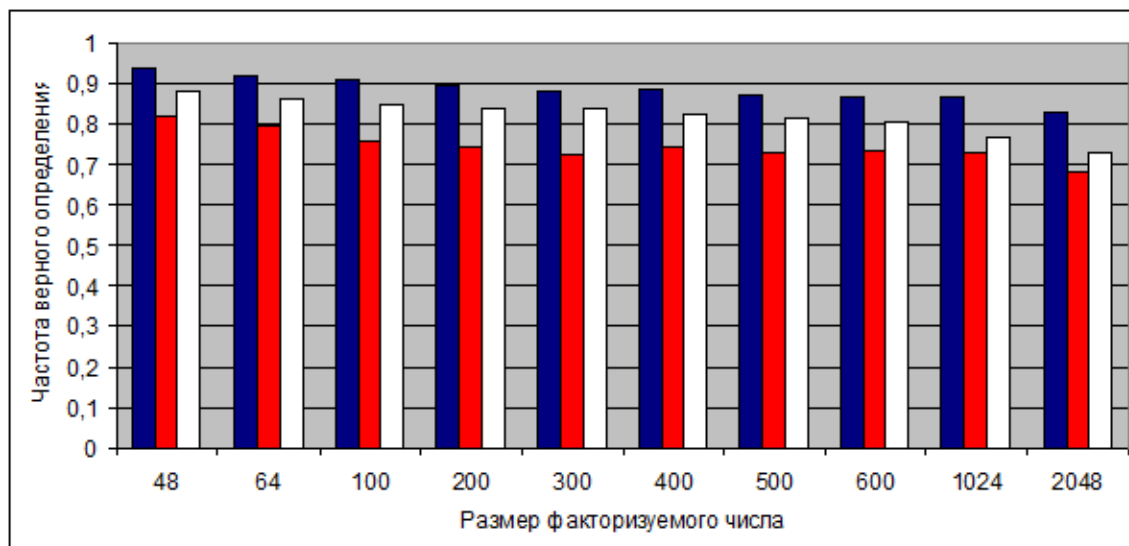


Рис.1. Гистограмма бит, верно определённых гибридным алгоритмом

На рис. 2 приведено сравнение долей верно определённых бит гибридного алгоритма с известными SAT-решателями победителями соревнований SAT2014 Competition[9]. Для сравнения было отобрано по 3 алгоритма-победителя в своих категориях: ApplicationBenchmark: minisat_blbd, HardCombinatorialBenchmark: Sparrow-ToRiss, RandomBenchmark: dimetheus.

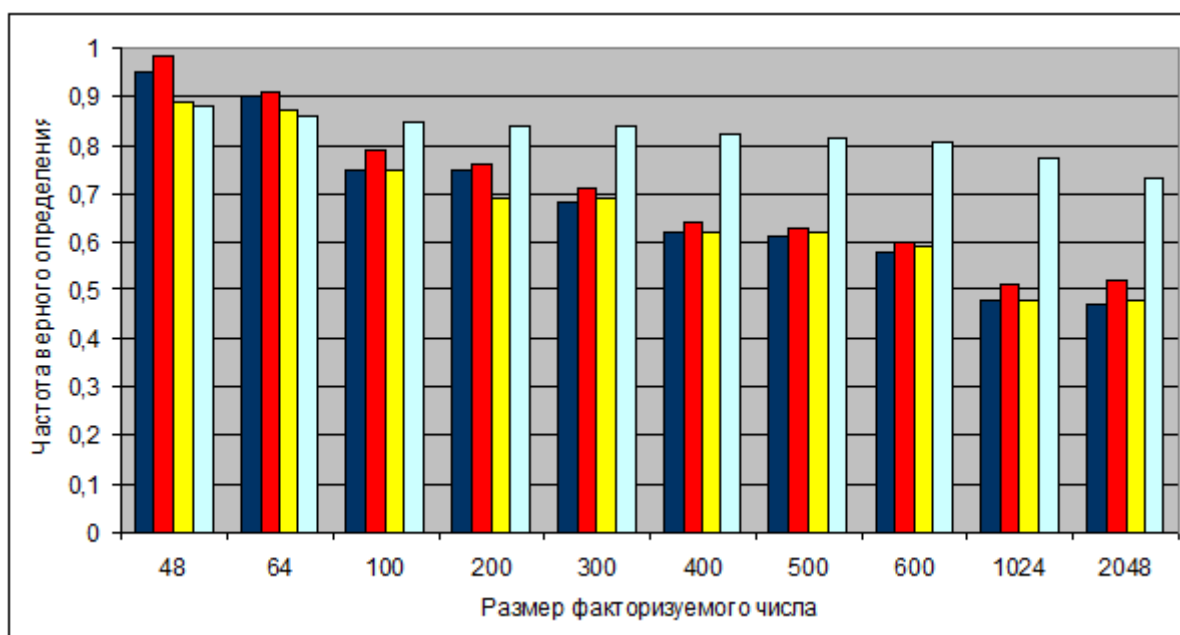


Рис. 2. Гистограмма сравнения разработанного метода с существующими аналогами

Доверительный интервал $\gamma = 0.1$, стандартное отклонение для minisat_blbd (синий столбец) $\sigma = 0.07$, для SparrowToRiss (красный столбец) $\sigma = 0.05$, для dimetheus (жёлтый столбец) $\sigma = 0.08$. Белый столбец соответствует гибриднему алгоритму. Как нетрудно заметить, на небольших размерностях разработанный метод не демонстрирует эффективности по сравнению с существующими аналогами, однако с увеличением размерности его преимущество становится очевидным.

Представленный гибридный алгоритм зависит от четырёх способов, а также от разбиения бит на кластеры, выполненного на основе частот верного определения каждым способом. По своей сути он является вероятностным, и, таким образом, не даёт достоверного ответа во всех случаях. Если решение не было найдено, то это не означает, что его не существует. Для улучшения данной ситуации возможно использование различных других известных SAT-решателей. В качестве такого был выбран распространённый алгоритм локального поиска GSAT [10], который также работает полиномиальное время.

Ниже приведён псевдокод по совместному использованию разработанного автором гибридного алгоритма и GSAT для поиска выполняющего набора булевой формулы, эквивалентной задаче факторизации целых чисел.

Алгоритм 3. Комбинированный алгоритм по распознаванию бит сомножителей в задаче факторизации целых чисел.

Вход: факторизируемое число $N = p * q$.

Шаг 1. Перейти от задачи факторизации целого числа $N = p * q$ к задаче выполнимости булевых формул $L^*(y)$.

Шаг 2. Применить к $L^*(y)$ алгоритм 2 данной статьи.

Шаг 3. Пусть S – приближение, выданное гибридным алгоритмом. Передать S на вход алгоритму локального поиска GSAT. Выполнять GSAT COUNT_ROUNDS = 1000 раундов или же пока выполняющий набор для $L^*(y)$ не будет найден.

Выход: выполняющий набор для формулы $L^*(y)$ или значение «решение не найдено».

Конец алгоритма 3.

На рис. 3 показан график интерполяции решения задачи факторизации по результатам тестирования чисел различных размерностей, отмеченных по горизонтали. Вертикальная шкала число раундов означает число итераций алгоритма локального поиска GSAT, потребовавшееся для нахождения решения. Предельное число раундов равняется 1000, и по достижении данного значения работа прекращается. Как видно из графика, числа размерностью до 417 включительно удаётся факторизовать комбинированным методом. К сожалению, числа большей размерности не удалось факторизовать за 1000 раундов – об этом свидетельствует горизонтальный участок кривой от 417 до 1024 бит, но в дальнейшем планируется улучшение результатов путём добавления дополнительных методов в гибридный алгоритм.

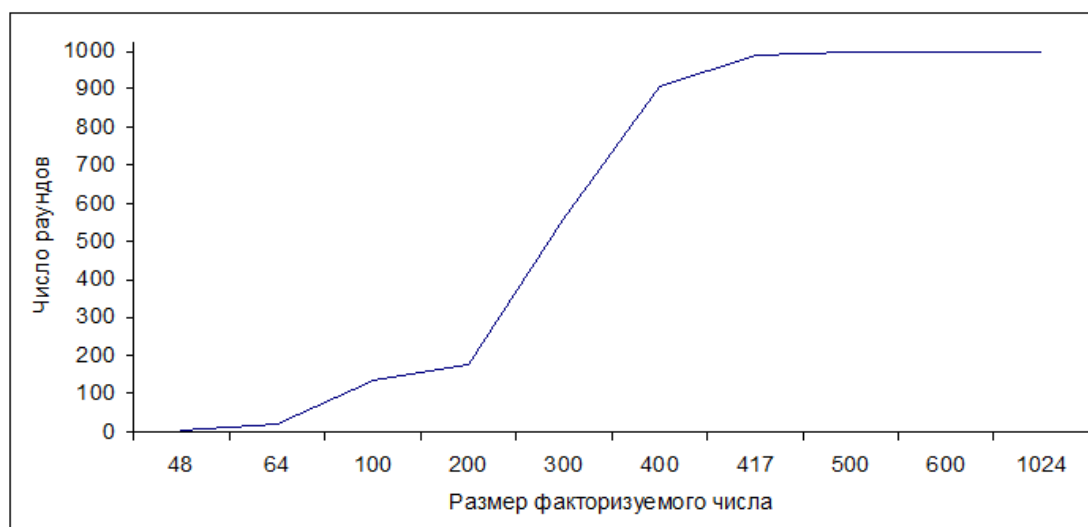


Рис. 3. Результаты исследования сочетания генетического алгоритма и GSAT

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено четыре различных способа по нахождению решения задачи выполнимости булевых формул, ассоциированных с задачей факторизации целых чисел. С помощью каждого из них возможно получение лишь приближённого решения, однако возможен и другой подход – накопить статистику по верному определению каждого бита путём многократного повторения эксперимента и сравнения соответствующих компонент с эталонным значением.

С помощью полученных частот проводится разбиение бит на четыре кластера, к каждому из которых впоследствии будет применяться только тот алгоритм, который определяет биты данного кластера с наибольшей частотой. Таким образом, был получен гибридный алгоритм, объединяющий лучшие свойства разработанных методов. В результате статистического тестирования установлено, что метод верно определяет до 94% нулевых и до 82% единичных бит.

Разработанный метод можно использовать как непосредственно сам по себе, так и в сочетании с другими известными алгоритмами, также работающими полиномиальное время. Показано, что в результате сочетания с алгоритмом локального поиска GSAT удаётся факторизовать число размерностью до 417 бит включительно. В дальнейшем планируется улучшить данный результат, добавляя новые методы к гибриднему алгоритму и тем самым повышая вероятность нахождения точного решения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-31-00057).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boneh D. Twenty Years of Attacks on the RSA Cryptosystem // Notices of the American Mathematical Society. 1999. Vol. 46 (2). P. 203–213.
2. Roy Arends. [dnssec-deployment] RSA-786 factorized. URL: <http://lists.dnssec-deployment.org/pipermail/dnssec-deployment/2010-January/003591.html>.
3. Patsakis C. RSA private key reconstruction from random bits using SAT solvers. URL: <https://eprint.iacr.org/2013/026>.
4. Dulkey V. I. Reduction of factorization, discrete logarithm and elliptic curve logarithm problems to solving associated satisfiability problem // Computer Optics. 2010. Vol. 34, no. 1. P. 118–123.
5. Dulkey V. I., Faizullin R. T., Khnykin I. G. Continuous approximation of SAT decision as applied to cryptographic analysis of asymmetric ciphers // Computer Optics. 2009. Vol. 33, no. 1. P. 86–91.
6. Дулькейт В. И., Огородников Ю. Ю., Файзуллин Р. Т. Гибридный метод поиска приближенного решения задачи 3-ВЫПОЛНИМОСТЬ, ассоциированной с задачей факторизации // Труды института математики и механики УрО РАН. 2013. Т. 33, no. 2. С. 285–294.
7. Огородников Ю. Ю. Проектирование вещественных переменных в булевы в методе простой итерации, применённом к задаче выполнимости булевых формул // Научный вестник НГТУ. 2015. Т. 58, no. 1. С. 183–200.
8. Faizullin R. T., Ogorodnikov Y. Y. Recognition of zero bits of 3-SAT problem by applying linear algebra's methods // Computer Optics. 2014. 38 (3). P. 521–528. DOI:10.1234/XXXX-XXXX-2014-3-521-528.
9. The international SAT competition web page. URL: <http://www.satcompetition.org>
10. Gu J. Local search for satisfiability (SAT) problem // IEEE Trans, on Systems, Man, and Cybernetics. 1993. Vol. 23, no. 4. P. 1108–1129. DOI: 10.1109/21.247892.

УДК 004.932

ФИЛЬТРАЦИЯ ЗНАЧИМЫХ ПРИЗНАКОВ НЕЧЁТКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАФА

Е. В. Пугин, А. Л. Жизняков

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, г. Муром, Россия*

Аннотация — Для поиска прямых или простых геометрических фигур на изображениях применяется преобразование Хафа и его модификации. Но это не позволяет полностью предотвратить выделение неинтересующих объектов. В статье предлагается оригинальный метод фильтрации прямых, получаемых в ходе нечёткого преобразования Хафа. Анализируются возможные взаимные расположения прямых на изображении. Рассматриваются различные расстояния между ними. Вводится новое расстояние, осно-

ванное на пересечении прямыми краёв изображения. Показаны методы группировки линий и их фильтрация на основе отбора по некоторому критерию. Проведено тестирование на реальных и тестовых изображениях труб. Разработанные методы показали высокое качество работы (до 5% ошибок) и эффективность (0.2-0.4 с./из.).

Ключевые слова: преобразование Хафа, нечёткие признаки, фильтрация прямых.

I. ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей при обработке изображений является выделение объектов на изображении. Существует большое число методов и алгоритмов, посвящённых этой проблеме. Для поиска простых геометрических фигур, таких как линии и круги, часто применяется преобразование Хафа [1]. Для данного алгоритма разработано большое число модификаций [2–4]. Отдельно стоит отметить варианты алгоритма с применением теории нечётких множеств [5–9]. Использование нечётких признаков позволяет значительно повысить качество результатов работы обычных методов.

Рассмотрим проблему поиска длинных протяжённых объектов на изображении (труб, линий связи, зданий). Для решения этой задачи используется преобразование Хафа. На выходе алгоритма имеем некоторое число найденных на изображении линий. Далее под «признаками» будем также понимать выделенные линии. Часто низкое качество изображения приводит к выделению лишних признаков изображения, которые необходимо отсеять. Возможно несколько подходов к решению этой задачи. Во-первых, улучшение алгоритма самого преобразования Хафа [4, 5]. Однако это не избавляет от проблемы лишних признаков. Во-вторых, проведение процедуры фильтрации или слияния полученных признаков после выполнения преобразования Хафа.

В статье описываются методы такой фильтрации линий, полученных в ходе работы преобразования Хафа. В качестве самого алгоритма используется нечёткое преобразование Хафа [5]. Для тестирования методов используются препараты тестовых и реальных изображений труб, а также других объектов. Изображения подготавливаются с помощью процедур контрастирования, выделения границ (оператор Кэнни), бинаризации и других.

II. НЕЧЁТКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХАФА

Прямая линия на изображении может быть представлена уравнением $y = kx + b$. В параметрическом пространстве признаков данная линия может быть представлена парой (k, b) . Но в этом случае проблему представляют вертикальные линии. Для её решения используется переход к другим параметрам: длине перпендикуляра к линии из начала координат ρ и углу наклона этого перпендикуляра θ к оси абсцисс. Уравнение прямой при этом выглядит как

$$y = -\frac{\cos \theta}{\sin \theta} x + \frac{\rho}{\sin \theta}$$

или

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta.$$

Тогда все линии, проходящие через точку (x_0, y_0) , удовлетворяют уравнению:

$$\rho = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta. \quad (1)$$

Таким образом, каждую линию на изображении можно сопоставить с парой (ρ, θ) . Пространство (ρ, θ) часто называют пространством Хафа. Выражение (1) соответствует синусоидальной линии в пространстве Хафа. Если две или более таких линий пересекаются в одной точке, это означает, что прямая на оригинальном изображении проходит через точки, соответствующие параметрам этих линий.

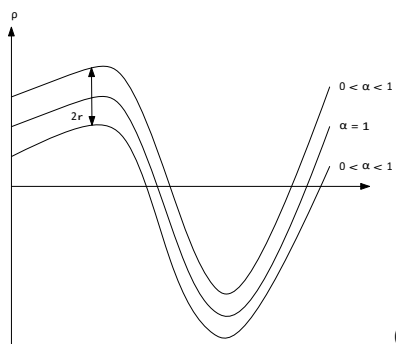


Рис. 1. Нечёткая точка в параметрической плоскости преобразования Хафа

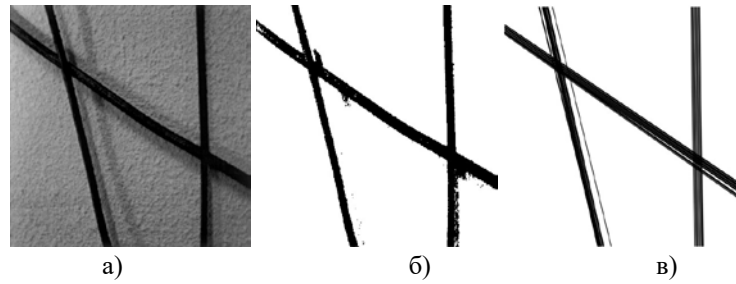


Рис. 2. Результат преобразования Хафа:

а) исходное изображение; б) бинаризованное; в) линии, выделенные на изображении

При нечётком преобразовании Хафа исходная точка изображения рассматривается как нечёткая с некоторой окрестностью или -срезом [5], α -срез представляет собой круг, описываемый уравнением окружности:

$$x(\psi) = x_0 + r \cos\psi.$$

$$y(\psi) = y_0 + r \sin\psi$$

Нечёткая точка лежит на линии (ρ, θ) , когда

$$\rho = (x_0 + r \cos\psi)\cos\theta + (y_0 + r \sin\psi)\sin\theta$$

или, упрощая,

$$\rho = x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta \pm r.$$

Изображение нечёткой точки в параметрической плоскости показано на рис. 1. Отмечается, что нечёткое преобразование Хафа довольно схоже с вероятностным преобразованием [4]. Все найденные точки на изображении переносятся в аккумуляторное пространство Хафа, из которого впоследствии выбираются точки с наибольшим накопленным значением. Они переводятся в линии на изображении.

III. АНАЛИЗ ЗАДАЧИ

Редко удаётся получить одну линию, не пересекающуюся с другими и находящуюся обособленно от соседней. На Рис. 2 показано исходное изображение трёх проводов, бинарный препарат, а также результат преобразования Хафа. Видно, что число линий довольно велико. В зависимости от желаемого результата в идеальном случае должно получиться 3 линии или 6 линий, то есть по линии на каждый край провода.

Для того чтобы корректно отфильтровать полученные линии, рассмотрим возможные случаи попарного взаимного расположения полученных прямых на изображении F размером $M \times N$:

- а) две невертикальные линии l_1 и l_2 пересекаются на изображении $l_1 \cap l_2 = A, A \in F$;
- б) две невертикальные линии l_1 и l_2 пересекаются за изображением $l_1 \cap l_2 = A, A \notin F$;
- в) две невертикальные линии l_1 и l_2 параллельны $l_1 \parallel l_2$;
- г) две линии l_1 и l_2 вертикальны $l_1 \parallel Oy, l_2 \parallel Oy$;
- д) одна из линий l_1 и l_2 вертикальна, точка пересечения находится на изображении $l_1 \parallel Oy, l_1 \cap l_2 = A, A \in F$;
- е) одна из линий l_1 и l_2 вертикальна, точка пересечения не находится на изображении $l_1 \parallel Oy, l_1 \cap l_2 = A, A \notin F$;

В случае, когда одна или обе линии вертикальны, для вычислений пользуются общим уравнением прямой на плоскости $Ax + By + C = 0$. В противном случае более удобным оказывается уравнение прямой с угловым коэффициентом $y = kx + b$. Возможные варианты расположения двух прямых показаны на рис. 3.

Покажем возможные подходы к фильтрации для каждого варианта. В случае а) необходимо удостовериться, что углы наклона k_1 и k_2 двух прямых l_1 и l_2 довольно близки. Иными словами, их разница не превышает определённого порога $\varepsilon: |k_1 - k_2| < \varepsilon$. Расстояние затем можно определить, усреднив угол наклона линий $k = |k_1 - k_2|$. Откуда одна прямая выше другой на $|b_1 - b_2|$. Из прямоугольного треугольника получаем $d = |b_1 - b_2| \sin(\arctan(k))$. Трудность здесь заключается в том, что на больших изображениях даже близкие по углу прямые, которые пересекаются, к примеру, в нижней части изображения, могут быть значительно удалены друг от друга в верхней части. Это в результате скажется на корректности процедуры фильтрации. В случае б) аналогичная процедура может внести ещё большую ошибку. Для в) необходимо вычислить расстояние между прямыми, как это показано для а).

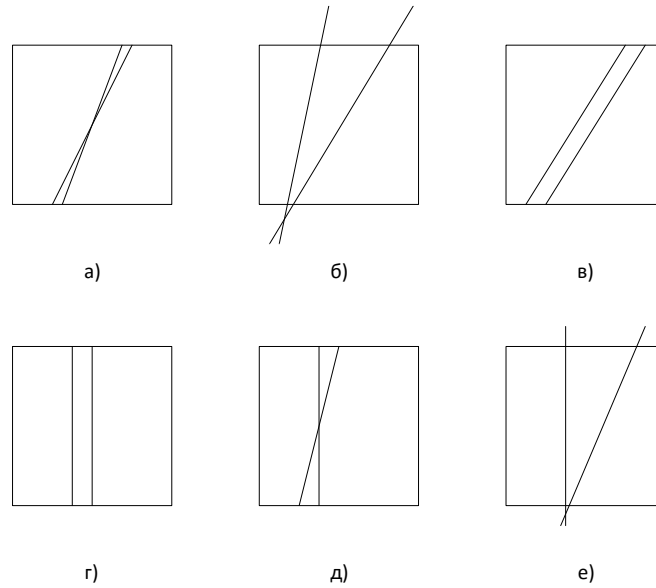


Рис. 3. Взаимное расположение двух линий на изображении

Для г) ищется разница между прямыми $x_1 = a_1$ и $x_2 = a_2$: $d = |a_1 - a_2|$. В общем случае для расположений г), д) и е) можно воспользоваться поворотом линий на α градусов (например, 90), а затем рассчитать расстояние по формулам из предыдущих пунктов. Проблемой в случае непараллельных линий является невертикальная линия, которая может при повороте на α градусов оказаться вертикальной. Для случаев д) и е) повторяют шаги а) по проверке порога ε , усреднению k и нахождению расстояния d . Также из-за этого возникают проблемы, описанные выше.

IV. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

Для решения описанных проблем предлагается краевой подход определения расстояния между линиями. Пусть изображение F размером $M \times N$ располагается нижним левым углом в начале координат. Оси Ox и Oy направлены вправо и вверх соответственно. Тогда изображение представляет собой прямоугольник $ONKM$, где точка K имеет координаты (M, N) . Ищутся пересечения каждой линии с отрезками ON, NK, KM, MO (рис. 4):

$$y = \frac{Ax + C}{-B}, x = \frac{By + C}{-A},$$

где за x или y в правой части выражения берут соответствующую величину: 0 для нижней и левой границы изображения, M или N — для правой или верхней.

Из четырёх точек отбирают только две P_1 и P_2 , лежащие на границах изображения $0 \leq Px \leq M, 0 \leq Py \leq N$, и сортируют по длине радиус-вектора $|\vec{r}| = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$. Затем находят расстояние между соответствующими точками d_{P_1} и d_{P_2}

$$d_P = \sqrt{(P_1x - P_2x)^2 + (P_1y - P_2y)^2}.$$

После этого вычисляют результирующее расстояние d по одной из формул:

$$d = \min(d_{P_1}, d_{P_2}),$$

$$d = \max(d_{P_1}, d_{P_2}).$$

Также можно воспользоваться более сложным выражением для результирующего расстояния. Например,

$$d = \frac{d_{\min} + d_{\max}}{2}.$$

На следующем этапе необходимо исключить лишние линии по некоторому признаку. Наиболее простым является пороговая фильтрация линий. Требуемое расстояние попарно вычисляется для всех линий на изображении. Если расстояние между двумя прямыми меньше заданного порога d_{\max} , то они заменяются одной, которая располагается «между ними». Под этим понимается нахождение такой линии l_3 , что

$$\alpha_1 \leq \alpha_3 \leq \alpha_2, d(1,3) = d(2,3) = \frac{d(1,2)}{2}, \quad (2)$$

где $d(l_1, l_2)$ – расстояние между линиями l_1 и l_2 , α_3 – угол наклона новой прямой. Стоит отметить, что данный подход отличается низким быстродействием, так как после каждого прохода, необходимо пересчитывать расстояния из-за появления новых линий.

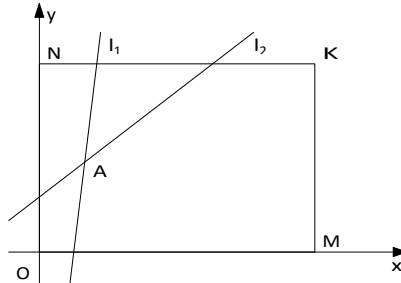


Рис. 4. Прямые l_1, l_2 на изображении $ONKM$

Другим способом является обработка с предварительной группировкой линий. После преобразования Хафа на изображении получается большое число соседних линий с близкими углами наклона, а, следовательно, с малым расстоянием между собой. Также часто на изображениях антропогенных объектов встречается много параллельных друг другу линий, разделённых чем-либо. Например, трубы на изображении и их границы, окна в здании, края дорог и т.д. Поэтому логичной будет группировка линий на изображении по их углу наклона с последующим выполнением процедуры фильтрации внутри каждой такой группы. Таким образом достигается разбиение задачи на более простые части.

Рассмотрим эту задачу более подробно. Пусть имеется множество прямых на изображении L . Каждая линия характеризуется углом наклона α . Требуется сгруппировать линии по углу так, что разница между минимальным углом линии в группе и максимальным была не больше αg : $\alpha_{max} - \alpha_{min} < \alpha g$. Обычно имеет смысл устанавливать значение αg на уровне 3-5 градусов. Более качественное разбиение можно получить, применяя методы кластеризации (к-средних, нечётких с-средних и др.). Получив множество групп $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$, необходимо провести для каждой группы описанный выше метод подсчёта расстояний между линиями и их фильтрацию. Наивная фильтрация в данном случае выполняется быстрее за счёт сокращения количества прямых в группе.

Помимо наивного метода способа также допустимо использовать алгоритмы кластеризации. Каждой линии группы можно сопоставить вещественное число — расстояние от центра кластера или от некоторой точки (начало координат, нулевая линия). Используя некоторый метод кластеризации для полученных расстояний, получим множество кластеров или групп G . Тогда итоговая линия, на которую нужно заменить весь кластер, может быть найдена, используя следующее выражение

$$\overline{d_{new}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i,$$

где n – число прямых в группе, d_{new} – расстояние новой линии от центра кластера (от центральной линии), d_i – расстояние до i -й линии в группе. Новая линия должна удовлетворять условию (2). Другим вариантом будет использование только первой и последних линий в кластере

$$d_{new} = \frac{d_{min} + d_{max}}{2}.$$

Часто съёмка объекта производится так, что камера жёстко фиксирована, а объекты интереса ориентированы в одном направлении. Тогда имеет смысл отбрасывать все линии, углы которых сильно отличаются от заданного:

$$|\alpha - \alpha c| < \Delta\alpha,$$

где αc – заданный угол, под которым расположены объекты на изображении; $\Delta\alpha$ – некоторое допустимое отклонение от заданного угла, в пределах которого всё ещё имеет смысл выбирать линии.

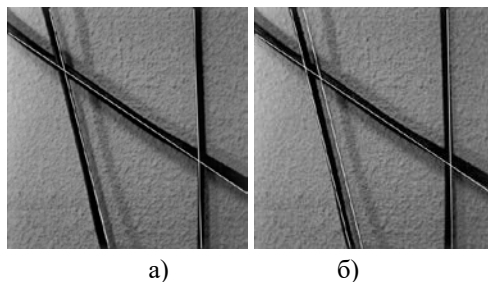


Рис. 5. Результат работы:
а) пороговая бинаризация; б) метод Отсу

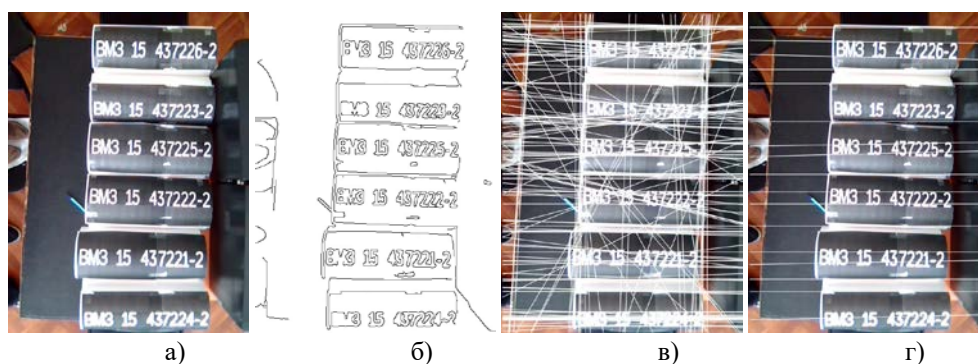


Рис. 6. Тестовые изображения:
а) макет труб; б) границы, выделенные на изображении;
в) линии, выделенные на изображении; г) отфильтрованные линии

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Выборка	Кол-во изобр.	Без ошибок	Процент правильных
Тестовая	30	29	96.6%
Реальная	40	38	95%

V. ТЕСТИРОВАНИЕ

На рис. 5 показан результат обработки изображения с помощью разработанного метода. Найденные линии отмечены белым цветом. Отличия заключаются в новой линии границы на рис. 5б. Это объясняется различными подходами к бинаризации изображения. Слева к изображению был применен бинарный фильтр с порогом 50, справа использован метод Отсу.

Более масштабное тестирование проводилось на изображениях, имеющих сложную структуру. Это снимки труб в промышленных и лабораторных (тестовых) условиях. Конечная задача состоит в извлечении информации с текстовых меток на трубах. В общем случае для её решения необходимо провести сегментацию исходного изображения [10–12] и отобрать нужный объект. Результаты обработки тестового кадра показаны на рис. 6, а реального – на рис. 7. Можно видеть, что число неинтересующих признаков (прямых) значительно снижается. Искомые объекты-трубы явно выделяются обрамляющими по краям линиями. В некоторых случаях можно наблюдать, что между соседними линиями заключена искомая метка, так как используется монотонный по высоте шрифт. Это значительно сужает область дальнейшего поиска и обработки. Данные области могут быть непосредственно использованы для извлечения информации с текстовой метки. Результаты тестирования приведены в табл. 1. Ошибкой считалось отклонение результирующей линии от реальной линии или границы исследуемого объекта на более чем 2% в каждую сторону.

Следует отметить, что изображения, снятые в высоком разрешении, имеет смысл уменьшать в размерах. При этом отбрасываются мелкие детали, которые лишь затрудняют преобразование Хафа и процесс фильтрации линий. Очевидно, что на небольшом изображении число найденных линий после преобразования Хафа будет значительно меньше. При необходимости возможно получение линий с изображения в разных масштабах для более точной фильтрации. Этот процесс называется многомасштабным анализом [13].

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод позволяет выполнить фильтрацию или «слияние» признаков (линий), полученных в ходе преобразования Хафа. Он наиболее эффективен в задачах поиска протяжённых объектов. Рассмотрены различные способы определения расстояния между линиями на изображении. Введено новое расстояние, описаны методы нахождения групп линий и их центров.

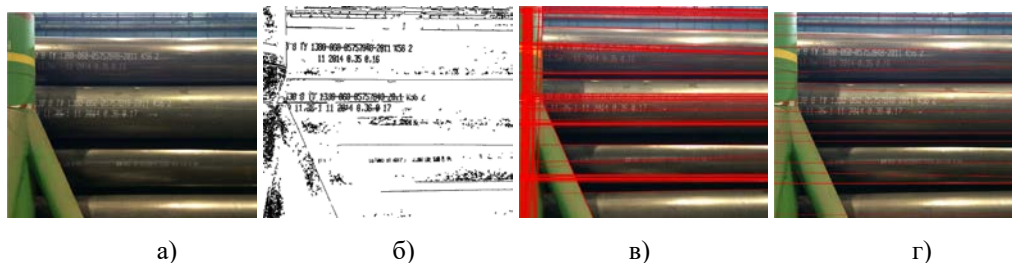


Рис. 7. Реальные изображения:
а) трубы в штабеле; б) границы, выделенные на изображении;
в) линии, выделенные на изображении; г) отфильтрованные линии

В ходе тестирования предлагаемый метод подтвердил свою эффективность. Процесс фильтрации выполняется за 0.2–0.4 с., что подтверждает применимость алгоритма в различных технических системах реального времени. Изображения полученные на выходе алгоритма могут использоваться для дальнейшей локализации и распознавания текстовых меток на основе существующих алгоритмов [13, 14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. O. Duda and P. E. Hart, “Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures”, *Commun. acm*, vol. 15, no. 1, PP. 11–15, Jan. 1972, : 0001-0782.
2. D. Ballard, “Generalizing the hough transform to detect arbitrary shapes”, *Pattern recognition*, vol. 13, no. 2, PP. 111–122, Jan. 1981.
3. S.-C. Jeng and W.-H. Tsai, “Fast generalized hough transform”, *Pattern recognition letters*, vol. 11, no. 11, PP. 725–733, Nov. 1990.
4. J. Matas, C. Galambos, and J. Kittler, “Robust detection of lines using the progressive probabilistic hough transform”, *Computer vision and image understanding*, vol. 78, no. 1, PP. 119–137, Apr. 2000.
5. J. H. Han, L. T. Koczy, and T. Poston, “Fuzzy hough transform”, in *Fuzzy systems, 1993., second ieee international conference on*, 1993, 803–808 vol. 2.
6. N. Suetake, E. Uchino, and K. Hirata, “Generalized fuzzy hough transform for detecting arbitrary shapes in a vague and noisy image”, *Soft computing*, vol. 10, no. 12, PP. 1161–1168, 2006, : 1433-7479.
7. O. Strauss, “Use the fuzzy hough transform towards reduction of the precision/uncertainty duality”, *Pattern recognition*, vol. 32, no. 11, PP. 1911–1922, 1999, : 0031-3203.
8. V. Chatzis and I. Pitas, “Fuzzy cell hough transform for curve detection”, *Pattern recognition*, vol. 30, no. 12, PP. 2031–2042, 1997, : 0031-3203.
9. S. Bhandarkar, “A fuzzy probabilistic model for the generalized hough transform”, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 24, no. 5, PP. 745–759, May 1994.
10. А. Л. Жизняков и В. Е. Гай, «Сегментация изображений на базе использования адаптивной локальной области», *Вестник компьютерных и информационных технологий*, № 1, С. 16–21, 2008.
11. А. Л. Жизняков и В. Е. Гай, «Адаптивный алгоритм сегментации изображений», *Инфокоммуникационные технологии*, т. 6, № 4, С. 96–101, 2008.
12. А. Л. Жизняков и Д. Г. Привезенцев, «Анализ возможностей применения фрактальных методов в промышленных системах обработки изображений», *Труды международного симпозиума Надежность и качество*, т. 2, С. 385–386, 2012.
13. А. Л. Жизняков и А. А. Фомин, «Классификация изображений микроструктур металлов на основе многомасштабных моделей», *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*, т. 4, № 2, С. 75–80, 2007.
14. A. L. Zhiznyakov and D. G. Privezentsev, “Detection of uncharacteristic blocks in an image with self-similarity”, *Pattern recognition and image analysis (advances in mathematical theory and applications)*, vol. 23, no. 3, PP. 375–380, 2013.

УДК 004.78:681.139.3,004.932

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УЧЕТА РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ, СОВМЕЩЕННОЙ СО СКУД

Е. Л. Романов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация – Предлагается архитектура системы учета рабочего времени и дисциплинарного контроля для небольшой организации, использующая данные системы контроля и управления доступом, распознавание лиц и анализ визуальных сцен средствами обработки изображений.

Ключевые слова: системы контроля и управления доступом, учет рабочего времени, дисциплинарные нарушения, регламент, архитектура.

I. ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В большинстве небольших организаций и предприятий, где не требуется соблюдение специальных требований по безопасности, системы контроля и управления доступом (СКУД) используются как средство ограничения доступа в рабочую зону служебные помещения или как компонент офисного менеджмента. Кроме того, они могут применяться для организации учета рабочего времени и решения задач дисциплинарного контроля.

Учет рабочего времени в СКУД основывается на данных, поставляемых компонентами идентификации на точках контроля (персональные пластиковые карточки, распознавание лиц). Но такие системы зачастую не учитывают «человеческий фактор», т.е. возможности нарушения регламента – принятых процедур идентификации на входе/выходе, например:

- передача карточки другому сотруднику;
- прохождение нескольких сотрудников по карточке одного из них.

Перечисленные нарушения являются, возможно, не столь существенными с позиций ограниченных требований к безопасности, но могут серьезно снизить достоверность данных в системе учета рабочего времени. Кроме того, в СКУД дисциплинарный контроль не рассматривается как компонента функционала (например, регламентированные «перекуры», выходы в соседние помещения).

Еще одним важным фактором является стоимость системы: в данных условиях она не может быть высокой как в общей сумме, так и в пересчете на одного сотрудника или на одну точку входа.

Из сказанного вытекают основные требования к разработке:

- СКУД для небольшой организации со штатом в пределах 50– 100 сотрудников;
- простая «топология» – размещение в одном здании с ограниченным количеством входов в виде *дверей*, отсутствие или ограниченное количество турникетов, отсутствие вахтеров или других лиц, ответственных за регламент;
- основные функции контроля и управления доступом, ограниченные требования к безопасности;
- учет рабочего времени сотрудников;
- фиксация реальных и потенциальных дисциплинарных нарушений для последующего «разбора полетов»;
- низкая стоимость в расчете на одного сотрудника и на один вход.

II. ОБСУЖДЕНИЕ

Для эффективного и комплексного решения проблемы необходимо обсудить доступные технические и программные компоненты и их характеристики.

9. Контроль доступа по карточкам

Комплектация оборудования для доступа по карточкам, включающая сетевой контроллер, замок, считыватели карт на обе стороны, весьма разнообразна и оценивается в 15000–20000 руб. на вход. Специальных требований, кроме спецификаций программного интерфейса программирования со стороны сервера не имеется.

10. Сетевые камеры

Требование к сетевым камерам заключается в определении минимального угла обзора, необходимого для охвата камерой распознаваемого объекта или сцены.

11. Биометрические системы контроля. Распознавание лиц.

В задаче распознавания лиц важным критерием является достоверность распознавания (вероятность отрицательного или ложного распознавания) как функция количества лиц в БД. Наиболее эффективными здесь являются методы, основанные на восстановлении 3D модели лица с помощью стереоизображения, получаемого с

двух видеокамер. При этом предлагаемые варианты использования основаны на проприетарном коде, «заши- том» в законченные технологические решения и устройства, стоимость которых варьируется от 25000 руб. для БД на 300 лиц в расчете на одно устройство [1] до 500000 руб. для БД на 10000 лиц на весь комплект оборудо- вания [2]. Стандартные алгоритмы, реализованные в открытых библиотеках [3], обычно обстраиваются набо- ром частных решений, повышающих их быстродействие и эффективность [4], однако результирующие харак- теристики в конкретных условиях работы сложно оценить а priori.

12. Анализ визуальных сцен

Средства дисциплинарного контроля базируются на анализе визуальных сцен, который, в свою очередь, ис- пользуется разнообразные подходы выделения и подсчета на изображении и в видеопоследовательности фигур людей [4,5]. Последние обычно представляют собой последовательность шагов обработки изображений, под- держиваемых стандартными библиотеками (например, вычитание фона, выделение контуров оператором Кэн- ни, распознавание лиц алгоритмов Виолы–Джонса и т.п.).

III. АРХИТЕКТУРА

1. Системное решение проблемы

Удовлетворительное системное решение проблемы с минимальными ресурсными затратами выглядит сле- дующим образом. Система строит модель движения группы людей (**образов**) по обеим сторонам двери (турни- кета) с последующей их идентификацией как **сотрудников** или **посторонних** лиц. Для этого используются:

система доступа по карточкам по входу и выходу;

лицевые камеры на вход и выход;

обзорная камера располагается непосредственно над дверным проемом, захватывает последний «боковым зрением», а также формирует перспективу общего плана с видом сверху (рис. 1).

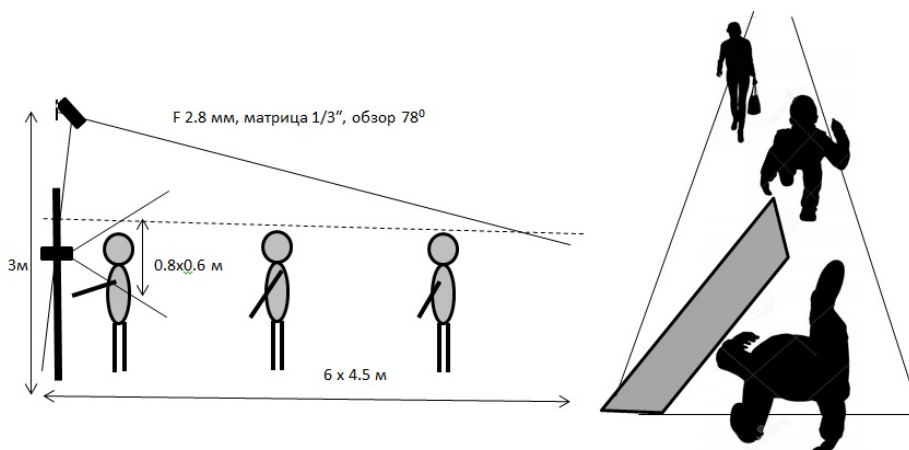


Рис. 1. Размещение камер и примерный вид визуальной сцены

В обоих случаях необходимо использовать короткофокусные камеры. Например, для фокусного расстояния 2.8 мм при размере матрицы 1/3" имеем размер поля изображения для лицевой камеры около 0.6 x 0.8 м при расстоянии до объекта 0.5 м, а для обзорной – примерное покрытие площади пола 4.5 x 6 м при расстоянии около 3.5 м с учетом наклона оси камеры.

Программные компоненты, работающие с *лицевой камерой*, используют стандартные решения, предоставляемые открытыми библиотеками, например OpenCV [3]. Их относительно низкая достоверность распознавания может быть компенсирована несколькими способами:

совмещением с данными контроля доступа по карточкам;

повторными попытками идентификации при отсутствии распознавания или несовпадении с идентификацией по карточке;

отнесением факта недостоверного распознавания к потенциальным нарушениям (фиксируемым погрешно- стям системы).

Обзорная камера, охватывая «боковым зрением» дверной проем, позволяет достаточно примитивными про- граммными решениями отслеживать перемещение *образов* в дверном проеме, а в совокупности с данными от других источников осуществлять их идентификацию. Одновременно с нее снимаются кадры общего плана для фиксации обнаруженного или потенциального нарушения.

2. Функционал

Основной функционал системы реализуется в приложении руководителя и включает в себя визуализацию текущей конфигурации, генерацию отчетов по учету рабочего времени для выбранного периода и сотрудника, просмотр зафиксированных и потенциальных нарушений по сохраненным кадрам лицевой камеры и камеры общего обзора и их обработка (удаление, коррекция данных учета рабочего времени, внесение в «черный список» и т.п.).

Вспомогательный функционал необходим для сопровождения и эксплуатации системы и включает в себя средства конфигурирования, трассировки, архивирования, логирования сбоев и событий, проверки работоспособности сервера и текущей конфигурации. Должен быть реализован в отдельном приложении системного администратора.

3. Архитектура

Основное архитектурное решение – многослойный клиент-сервер с общим программным кодом нижних уровней и тремя видами клиентов: руководителя, администратора и анализатора сцен (последний формально является компонентом сервера). Программный код системы содержит пакеты архитектурных классов в среде разработки Java для представления данных и функционирования системы в целом и ее компонент, в том числе:

- коннектор JDBC к базе данных в серверном приложении;
- DAO-классы табличных объектов БД;
- классы бизнес-объектов предметной области, средства компоновки хранимых объектов из DAO (сцена, образ, сотрудник, посторонний, нарушение);
- технологические классы серверного приложения (обработка исключений, завершение, восстановление, многопоточность, синхронизация);
- поддержка серверным приложением webAPI клиентов, в том числе передача файлов изображений;
- серверная компонента анализа сцен;
- классы клиентских приложений руководителя и администратора (представление и бизнес-процесс)

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные выше системные и архитектурные решения составляют фазу исследования проекта (согласно методологии UP). Сюда же входит разработка программного прототипа для оценки их работоспособности, атрибутов качества, а также моделирования альтернативных решений. В совокупности это позволит снизить риски последующих этапов, а также объективно оценить сроки и стоимость разработки программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anviz FacePass – автономная система распознавания лиц. URL: <http://biometric.su/anviz-facepass-facial-recognition.html>
2. Сигма-ИС RM3-Детектор-10 000. URL: <http://videoglaz.ru/good.php?id=146397>
3. Face Recognition with OpenCV. URL: http://docs.opencv.org/2.4/modules/contrib/doc/facerec/facerec_tutorial.html
4. Филиппов И. В., Кононов В. А., Конушин В. С., Конушин А. С. Подсчет количества людей в видеопоследовательности на основе детектора головы человека // Программные продукты и системы. 2015. №1 (109). С.121–125.
5. Демин Н. А. Проектирование системы распознавания динамического поведения людей // Молодежный научно-технический вестник. 2015. №12. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/824090.html> (дата обращения: 25.05.2016).

УДК 004.93

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ АВТОГРАФА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОДПИСАНТА

А. Е. Самогуга

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Аннотация – В настоящее время продолжается процесс активного внедрения информационных технологий, который выражается, в том числе, в постепенном переходе на использование электронных документов. В то же время в электронных документах наряду с электронной подписью продолжают ис-

пользовать и рукописный автограф. Одним из направлений использования рукописного автографа в электронных документах является авторизация подписанта. Но при аутентификации по автографу остается неясным, насколько стабильными остаются его динамические характеристики при воспроизведении в условиях типичных воздействий на организм: принятие алкоголя, снотворного, после физической или умственной нагрузки. Если окажется, что регистрируемые параметры зависят от функционального состояния субъекта формируемого указанными воздействиями, следует что можно использовать данные параметры для идентификации субъекта и его функционального состояния, так как они не являются устойчивыми.

В данной работе исследуются устойчивость геометрических параметров автографа и время воспроизведения автографа. Индикатором изменения состояния служит частота сердечных сокращений. Показателем устойчивости выбраны отношения среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию коэффициентов корреляции между функциями координат пера и давления пера на плоскости при воспроизведении автографа, полученными из различных реализаций автографов субъектов, полученными в одинаковом состоянии. Описаны результаты проверки возможности использования данных параметров в эталонных описаниях субъектов для идентификации функциональных состояний субъектов.

Ключевые слова: биометрическая идентификация, функциональное состояние, частота сердечных сокращений, подписанты, особенности воспроизведения автографа.

I. ВВЕДЕНИЕ

Ключевым направлением информационной безопасности считается защита информации от несанкционированного доступа. Все чаще основной причиной инцидентов, связанных с нарушением безопасности, по данным The Global State of Information Security Survey 2014 (глобальным исследованием информационной безопасности, проведенным фирмой PwC и журналами CIO и CSO), являются сотрудники (31%) и бывшие сотрудники компаний (27%). Согласно Zecurion за 2013-й и 2014 годы совокупные потери мировой экономики от инсайдерских атак составили более 42 млрд. долларов [1]. Таким образом, постановка задачи защиты информации изменилась: «Создать защиту от того, кому разрешено все в соответствии со служебными обязанностями» [2].

Отметим, что дальнейшее усовершенствование традиционных средств защиты не исправит ситуацию. Наглядный пример – осужденный за свои преступления К. Митник, который узнавал пароли к информационным ресурсам при помощи методов социальной инженерии. По мнению хакера наиболее уязвимое место в системе безопасности – «человеческий фактор» [3]. Таким образом, сегодня остро стоит проблема защиты информации от несанкционированных действий авторизованного пользователя компьютерной системы. Судить о лояльности действий сотрудника можно, анализируя его физиологическое состояние (ФС) в момент выполнения должностных обязанностей, а также во время аутентификации. Для решения этой задачи можно использовать особенности написания подписи. В последние годы интерес исследователей был сконцентрирован на усовершенствовании данной технологии. Один из лучших результатов, продекларированных в конце 90-х годов по верификации подписи, составлял 4% – сумма вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода [4]. В 2000 году эта цифра возросла до 13% [5], в 2002 году она снизилась до 2% [6]. Лучший результат 2003 года – 2,78% [7], 2008 года – 3,3% [8], 2012 года – 1% [9], 2013 года – 2,8% [10]. Если расширить перечень результатов, полученных на этом направлении за обозначенный период времени, они значительно различаются даже в случаях, когда применяемые алгоритмы идентификации были идентичны. Известно, что изменение ФС субъекта отражается на его почерке [11-12]. Имеется точка зрения, что разница в надежности распознавания субъектов для указанных технологий вызвана различием ФС испытуемых на этапах прохождения процедуры идентификации и создания эталона. Следовательно, использование информации о ФС субъектов как во время создания эталонов, так и в процессе идентификации, кроме ответа на вопрос о состоянии субъекта и возможности допуска его к информации или информационным ресурсам, может также положительно повлиять на надежность распознавания субъектов.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель данной работы оценить устойчивость параметров автографа в процессе его воспроизведения при изменении функционального состояния подписанта. Для достижения обозначенной цели необходимо решить ряд задач. Во-первых, следует определиться с изучаемыми состояниями. Затем следует выбрать способ определения того, что состояние субъекта изменилось. Только после этого можно перейти к формированию базы данных автографов в выделенных состояниях. Далее, получить интересующие автора параметры автографа. Следующим шагом является проверка однородности выборок параметров и оценка их устойчивости. Завершающий этап включает анализ полученных результатов и формулирование выводов на их основе.

III. ТЕОРИЯ

В ходе выполнения данной работы создана база эталонов для 15 субъектов, находящихся в 4 функциональных состояниях («адекватное», «после физической нагрузки», «после потребления алкоголя», «состояние засыпания»), по 30 подписей в каждом состоянии. Индикатором изменения состояния субъекта служит сердечно-сосудистая система. Достаточно надежным показателем реакции является вариабельность сердечного ритма. При отсутствии внешних воздействий на организм и стабильной частоте сердечных сокращений принимается, что субъект находится в адекватном состоянии. В состоянии «после физической нагрузки», субъект вводился путем выполнения им физических упражнений – приседаний. Изменение состояния проявлялось в увеличении частоты сердечных сокращений субъекта. Количество приседаний для каждого испытуемого выбиралось индивидуально, но не менее 30 раз. В кардиологии при выполнении пробы с физической нагрузкой ЭКГ используют пробу Мартине (20 приседаний за 30 секунд). В источнике [13] упоминается упрощенный способ проведения теста с физической нагрузкой (проба с приседаниями). Согласно [13] количество требуемых для оценки пробы приседаний будет колебаться в зависимости от возраста и пола. Пациентам мужского пола до 25 лет предлагается произвести 30 приседаний. Согласно интерпретации результатов увеличение ЧСС на 0–30% считается нормальной реакцией сердечно-сосудистой системы при проведении данной пробы. Для выполнения перехода субъекта в состоянии после потребления алкоголя, для каждого испытуемого были выполнены расчеты по формуле (1) М. П. Видмарка:

$$c = \frac{A}{m \times r}, \quad (1)$$

где c – концентрация алкоголя в крови в %, A – масса выпитого напитка в граммах, m – масса тела в килограммах, r – коэффициент распределения Видмарка (0,70 – для мужчин, 0,60 – для женщин).

В ходе расчетов масса употребленного должна соответствовать такому количеству алкоголя, для которого значение концентрации равняется 0,5 %. Данный уровень превышает допустимый уровень концентрации алкоголя для водителей транспортных средств в РФ, соответствует методическим указаниям Минздрава, в ряде работ [14, 15] показано, что данный уровень концентрации алкоголя приводит к статистически значимым изменениям ВСР.

Для ввода субъектов в состояние засыпания использовался препарат настойка пустырника в каплях. Достижение необходимого состояния субъектов гарантировалось приемом количества капель препарата, рассчитанного по рекомендованной фармацевтом методике. Отметим, что все испытуемые не имели психических заболеваний. Испытуемому предлагалось принять индивидуально рассчитанную порцию препарата за 20 минут до начала эксперимента.

Информация о частоте сердечных сокращений регистрировалась на холтеровском мониторе «Кардиотехника 04».

Состояние субъекта оценивалось по 3-м параметрам ВСР: M – средний R - R интервал анализируемого временного ряда, $SDNN$ – среднееквадратичное отклонение R - R интервалов анализируемого временного ряда и $b1$ – тангенс угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма [16]. Разработчиками метода построения и анализа структуры сердечного ритма являются Машин и Машина [17]. Граф задается последовательностью вершин с координатами RR_n и RR_{n+1} . Значение $b1$ можно вычислить по формуле 2.

$$b1 = C1 \times (S_{n+1} \div S_n)$$

где $C1$ – коэффициент автокорреляции после первого сдвига, так как дисперсии RR_n и RR_{n+1} практически равны, то принимают, что $b1 = C1, S_{n+1}, S_n$.

Перечисленные признаки были выбраны исходя из возможности скрытого дистанционного определения частоты пульса [18].

Далее, прежде чем будут выполнены расчеты коэффициентов корреляции, необходимо выполнить выравнивание автографа по длительности. Для выполнения выравнивания использовался алгоритм, сохранялись значения длительности реализаций – T , находился автограф с минимальным количеством значений $x(t), y(t), p(t)$ и при помощи интерполяции все остальные автографы приводились к этой длительности. Ниже (рис 1.) представлены изображения подписи до и после интерполяции



Рис. 1. Изображение подписи: а – до интерполяции; б – после интерполяции

Затем выполнялись вычисления коэффициентов корреляции по формуле:

$$r_{xy} = \frac{M(X - M(X))M(Y - M(Y))}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

где $M(X)$, $M(Y)$ – математические ожидания X и Y , σ_x , σ_y – средние квадратичные отклонения X и Y ,

$$\mu_{xy} = M(X - M(X))M(Y - M(Y))$$

где μ_{xy} – корреляционный момент.

После чего были получены выборки коэффициентов корреляции rx_ix_j , ry_iy_j , rp_ip_j , которые вычислены для автографов субъекта в одинаковом состоянии из разных реализаций и rx_iy_i , ry_ip_i , rx_ip_i из одних и тех же реализаций. То есть, для каждого субъекта в каждом состоянии, были получены выборки rx_ix_j , ry_iy_j , rp_ip_j и rx_iy_i , ry_ip_i , rx_ip_i .

Следующим шагом было выполнение проверки гипотез об однородности выборок для разных состояний, то есть гипотезы о том, что рассматриваемые выборки извлечены из одной и той же генеральной совокупности при помощи критерия Колмогорова–Смирнова [19].

В результате были получены таблицы для каждого испытуемого, например в табл. 1 отображены результаты для испытуемого. Гипотезы H_0 – выборки однородны (извлечены из одной и той же генеральной совокупности), H_1 – неоднородны.

Затем, была выполнена оценка устойчивости путем построения плотностей распределений для gx_ix_j , gy_iy_j , gp_ip_j и нахождения

$$y_{kv} = \frac{1}{4} \sum_i y_{kvi},$$

$$y_{kvi} = \frac{\sigma_{kvi}}{m_{kvi}},$$

где $i = rx_ix_j$, ry_iy_j , rp_ip_j , T (длительность реализаций); v – состояние k -го подписанта, σ – среднеквадратичное отклонение, m – математическое ожидание, k – номер испытуемого. Аналогично y_{kvi0} , для rx_iy_i , ry_ip_i , rx_ip_i .

Чем меньше полученное значение y_{kv} , тем меньший разброс показателей воспроизводимых автографов.

Также предпринята попытка выявления дополнительных особенностей подписантов по степени связи между $x(t)$, $y(t)$, $p(t)$, то есть, получены распределения вероятностей коэффициентов корреляции rx_iy_i , ry_ip_i , rx_ip_i и устойчивость этих связей y_{kv0} аналогично y_{kv} , но $i = rx_iy_i$, ry_ip_i , rx_ip_i .

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для каждого субъекта в каждом состоянии построены функции плотностей распределения перечисленных параметров ВСР, распределенных по нормальному закону распределения (рис 2, 3, 4).

Перед проведением эксперимента по идентификации состояния оцениваются параметры М, SDNN, b1 испытуемого. Находятся вероятности из полученных распределений и при помощи модифицированной формулы гипотез Байеса вычисляется максимальная вероятность, указывающая на состояние, в котором находился испытуемый. Ниже, на рис. 2, представлены распределения вероятностей параметров ВСР для испытуемого 3 в 4 разных состояниях.

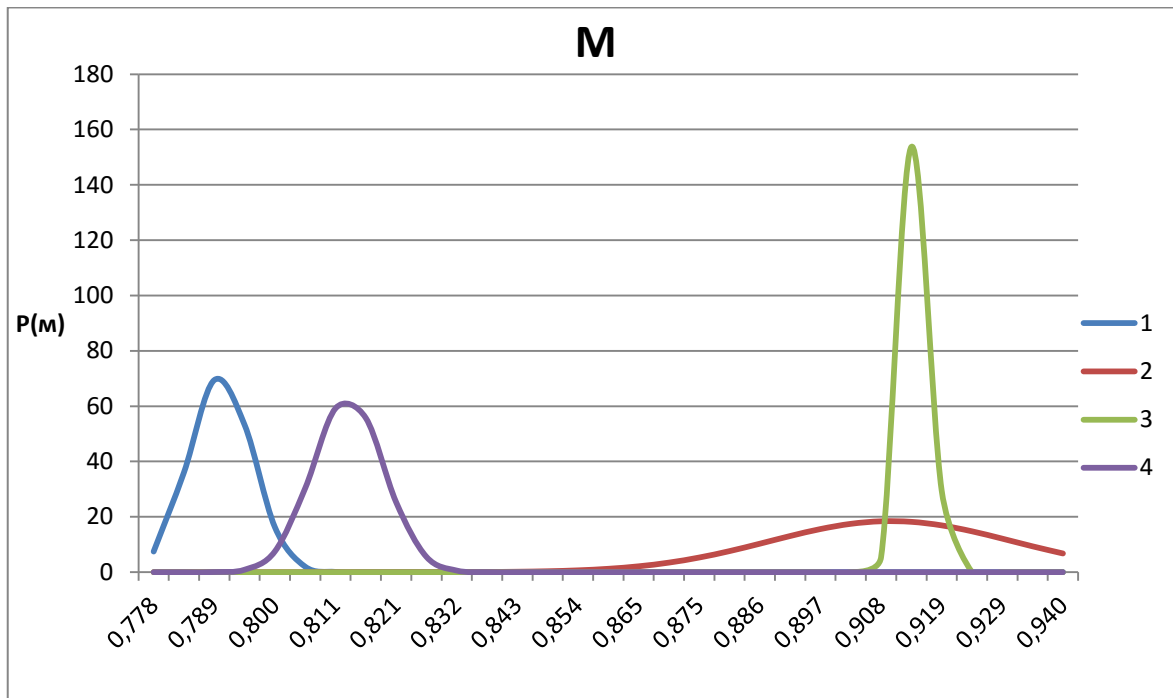


Рис. 2. Функции плотности распределения: среднего RR интервала:
 1– после употребления алкоголя, 2– после физической нагрузки,
 3 – адекватное состояние, 4 – сонное состояние

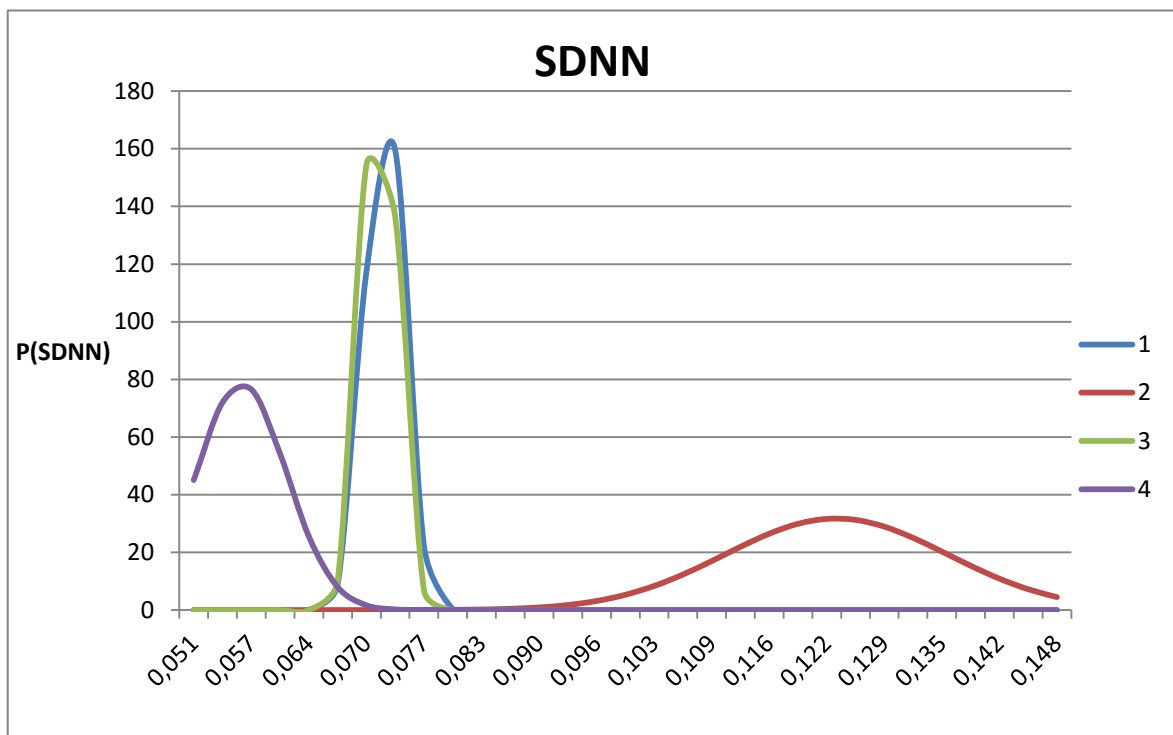


Рис. 3. Плотность распределения: среднеквадратичного отклонения RR интервалов:
 1– после употребления алкоголя, 2– после физической нагрузки,
 3 – адекватное состояние, 4 – сонное состояние

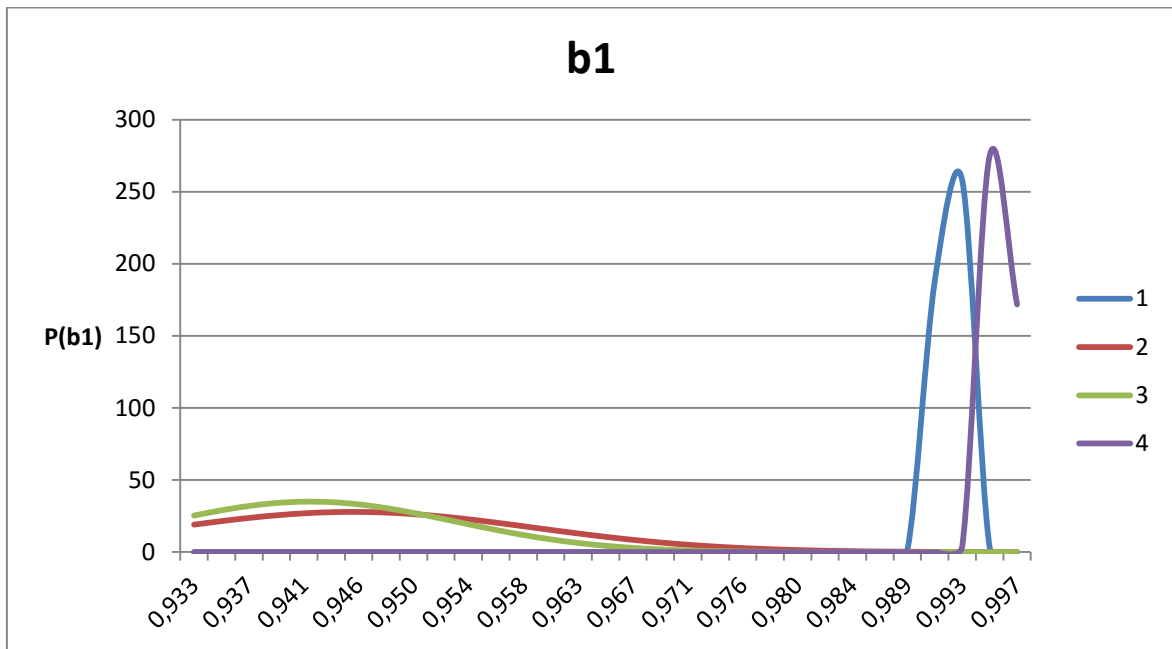


Рис. 4. Плотность распределения тангенса угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма: 1 – после употребления алкоголя, 2 – после физической нагрузки, 3 – адекватное состояние, 4 – сонное состояние

Субъекты воспроизводили автографы 30 раз в каждом состоянии, на графическом планшете Intuos5 Touch L фирмы Wacom.

Каждая реализация автографа сохранялась в файл в виде координат $x(t)$, $y(t)$ и давления $p(t)$.

Далее проведены расчеты коэффициентов корреляции $g_{x_i x_j}$, $g_{y_i y_j}$, $g_{r_i p_j}$ и $g_{x_i y_i}$, $g_{y_i p_i}$, $g_{x_i p_i}$, после чего выполнена проверка гипотез об однородности выборок данных параметров для каждого испытуемого в разных состояниях при помощи критерия Колмогорова–Смирнова.

В табл. 1 приведены результаты проверки однородности коэффициентов корреляции $g_{x_i x_j}$, $g_{y_i y_j}$, $g_{r_i p_j}$ и $g_{x_i y_i}$, $g_{y_i p_i}$, $g_{x_i p_i}$ для разных состояний испытуемого 1. Эти данные получены по следующему алгоритму:

- 1) принимаются гипотезы $H_0: F_1(x) = F_2(x)$ против конкурирующей $H_1: F_1(x) \neq F_2(x)$, где $F_1(x)$ и $F_2(x)$ – неизвестные теоретические функции распределения двух независимых выборок;
- 2) далее рассчитывается статистика критерия Колмогорова-Смирнова по формуле 4

$$\lambda' = \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \times \max |F_{n_1}(x) - F_{n_2}(x)|, \quad (4)$$

где $F_{n_1}(x)$ и $F_{n_2}(x)$ – эмпирические функции распределения, построенные по двум выборкам объемов n_1 и n_2 ;

- 3) на следующем шаге принималось решение о том, отвергается гипотеза H_0 или нет. Гипотеза H_0 отвергается, если фактически наблюдаемое значение статистики λ' больше критического $\lambda'_{кр}$, т.е. $\lambda' > \lambda'_{кр}$ и принимается в противном случае. Значение $\lambda'_{кр}$ является табличным и зависит только от уровня значимости α , который зависит от количества элементов в выборке.

ТАБЛИЦА 1

ГИПОТЕЗЫ ОБ ОДНОРОДНОСТИ ПОДПИСАНТА ИСПЫТУЕМЫЙ 1, СОСТОЯНИЯ: 1 – ПОСЛЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ АЛКОГОЛЯ, 2 – ПОСЛЕ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ, 3 – АДЕКВАТНОЕ, 4 – СОННОЕ. H_0 – ВЫБОРКИ ОДНОРОДНЫ, H_1 – ВЫБОРКИ НЕОДНОРОДНЫ

Выборки	3 – 1	3 – 2	3 – 4	1 – 2	1 – 4	2 – 4
Критерий	$g_{x_i x_j}: H_1$	$g_{x_i x_j}: H_1$	$g_{x_i x_j}: H_1$	$g_{x_i x_j}: H_1$	$g_{x_i x_j}: H_1$	$g_{x_i x_j}: H_1$
	$g_{y_i y_j}: H_1$	$g_{y_i y_j}: H_1$	$g_{y_i y_j}: H_1$	$g_{y_i y_j}: H_1$	$g_{y_i y_j}: H_1$	$g_{y_i y_j}: H_1$
	$g_{r_i p_j}: H_0$	$g_{r_i p_j}: H_1$	$g_{r_i p_j}: H_1$	$g_{r_i p_j}: H_1$	$g_{r_i p_j}: H_1$	$g_{r_i p_j}: H_1$
	$g_{x_i y_i}: H_0$	$g_{x_i y_i}: H_0$	$g_{x_i y_i}: H_0$	$g_{x_i y_i}: H_0$	$g_{x_i y_i}: H_0$	$g_{x_i y_i}: H_0$
	$g_{y_i p_i}: H_0$	$g_{y_i p_i}: H_0$	$g_{y_i p_i}: H_0$	$g_{y_i p_i}: H_0$	$g_{y_i p_i}: H_0$	$g_{y_i p_i}: H_0$
	$g_{x_i p_i}: H_0$	$g_{x_i p_i}: H_0$	$g_{x_i p_i}: H_0$	$g_{x_i p_i}: H_0$	$g_{x_i p_i}: H_0$	$g_{x_i p_i}: H_0$

Согласно полученным результатам, примерно в 85% случаях $g_{x_i x_j}$, $g_{y_i y_j}$, $g_{r_i r_j}$ для разных состояний являются неоднородными, при этом в 100% случаях $g_{x_i x_j}$, $g_{y_i y_j}$ являются неоднородными (не принадлежат к одной генеральной совокупности), а значит, могут они применяться для идентификации неадекватных состояний. Выборки $g_{x_i y_i}$, $g_{y_i r_i}$, $g_{x_i r_i}$ в разных состояниях в 100% случаях однородны, следовательно, устойчивы и не могут использоваться для идентификации состояний.

Результаты вычислений приведены в таблицах и на рисунках ниже (рис. 5, 6, 7, 8). Рисунки приведены для всех состояний испытуемого 1.

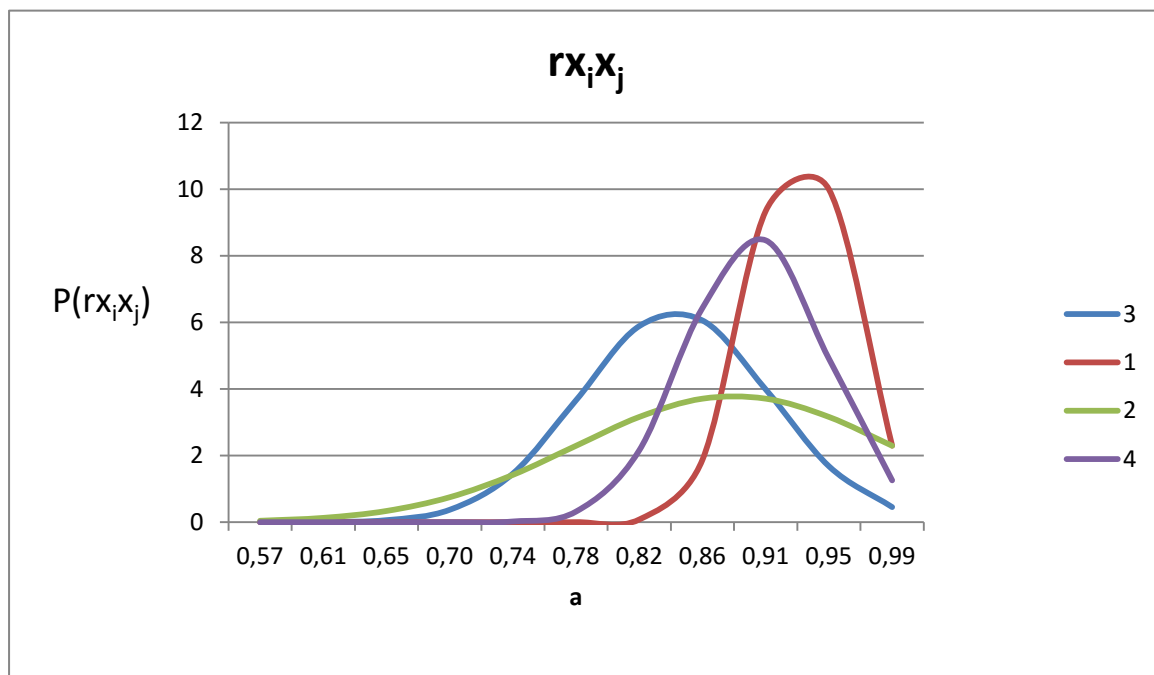


Рис. 5. Плотности распределения вероятностей коэффициентов корреляции $g_{x_i x_j}$ для испытуемого 1: где 1 – после употребления алкоголя, 2 – после физической нагрузки, 3 – адекватное состояние, 4 – сонное состояние

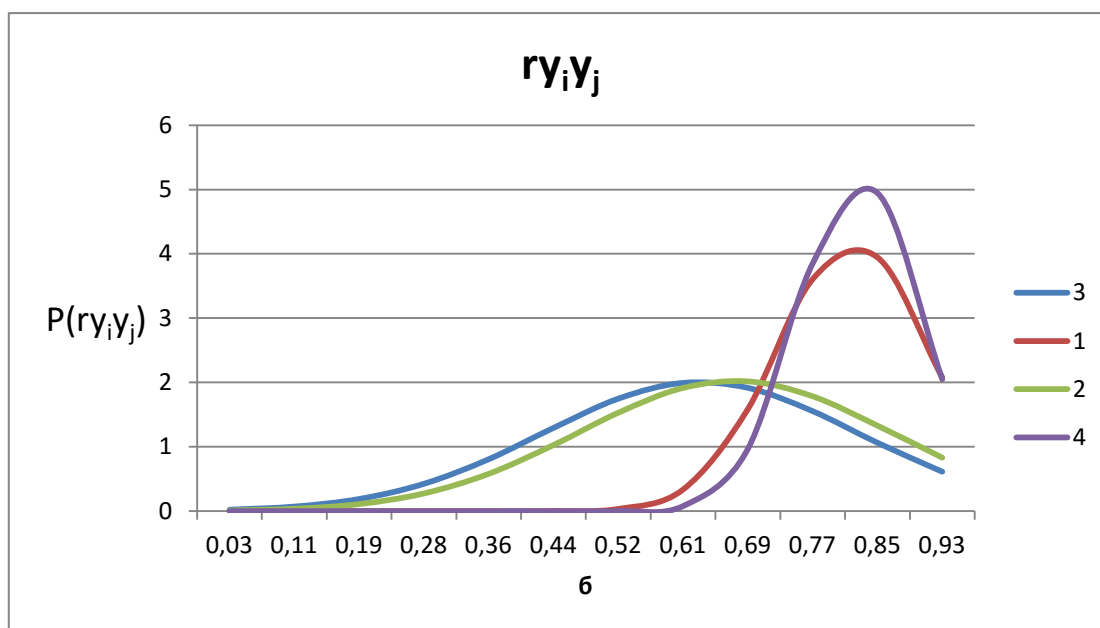


Рис. 6. Плотности распределения вероятностей коэффициентов корреляции $g_{y_i y_j}$ для испытуемого 1: где 1 – после употребления алкоголя, 2 – после физической нагрузки, 3 – адекватное состояние, 4 – сонное состояние

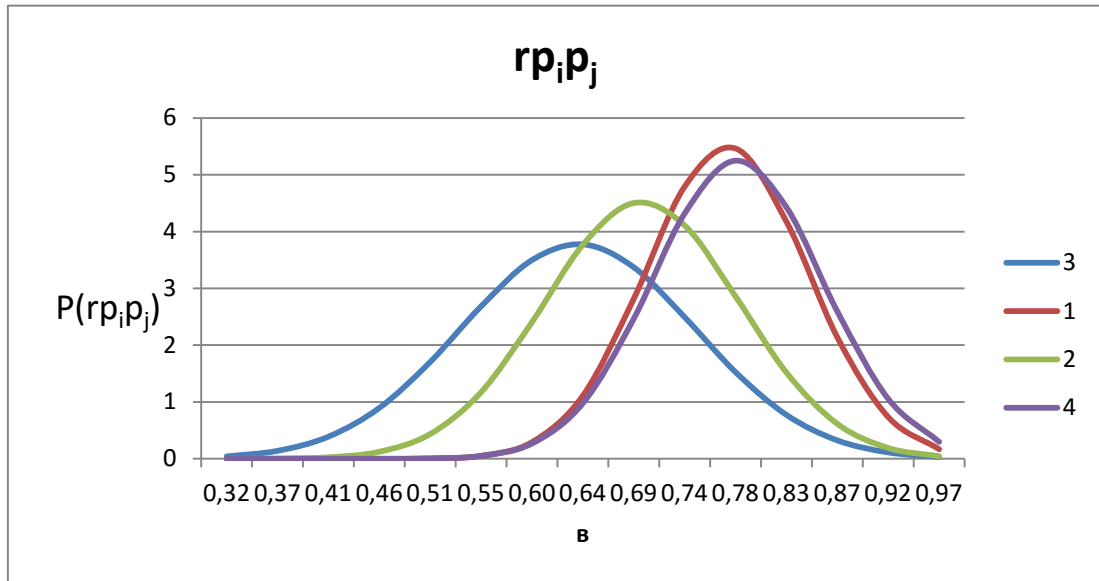


Рис. 7. Плотности распределения вероятностей коэффициентов корреляции $r_{p_i p_j}$ для испытуемого 1: где 1– после употребления алкоголя, 2– после физической нагрузки, 3 – адекватное состояние, 4 – сонное состояние

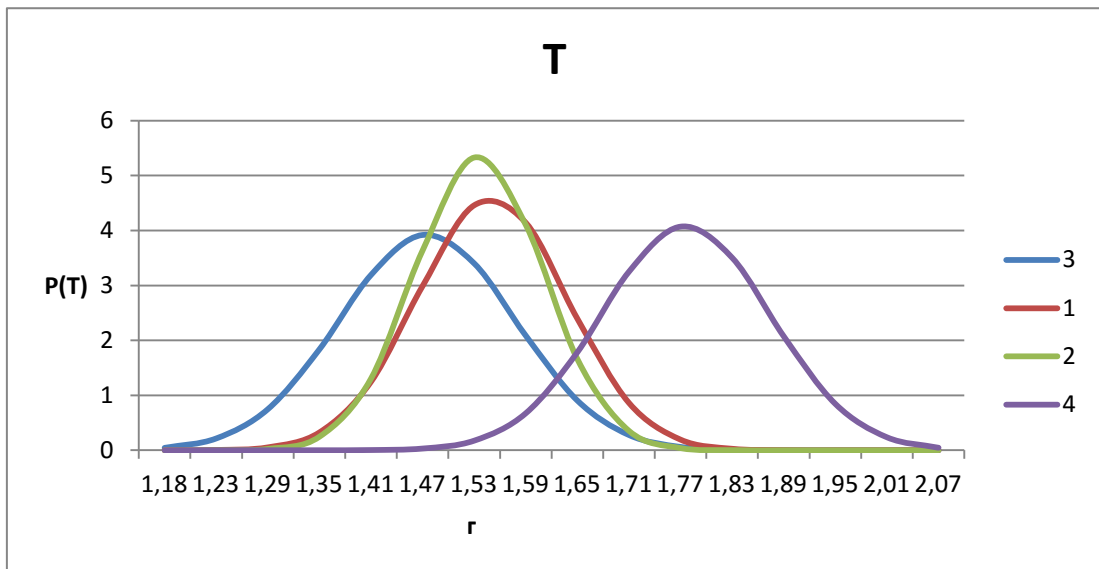


Рис. 8. Плотности распределения вероятностей длительности воспроизведения автографа T для испытуемого 1: где 1– после употребления алкоголя, 2– после физической нагрузки, 3 – адекватное состояние, 4 – сонное состояние

В табл. 2 представлены результаты расчета устойчивости для всех испытуемых.

ТАБЛИЦА 2
ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ИСПЫТУЕМЫЙ 1

ИСПЫТУЕМЫЙ 1				
состояние	3	1	2	4
у _{kv}	0,156	0,076	0,147	0,074
у _{kv0}	0,668	0,277	0,751	0,444
ИСПЫТУЕМЫЙ 4				
у _{kv}	0,123	0,305	0,115	0,304
у _{kv0}	-0,037	2,837	-0,014	0,041

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ 2

ИСПЫТУЕМЫЙ 5				
ykv	0,075	0,079	0,299	0,349
ykv0	0,470	0,322	0,673	2,130
ИСПЫТУЕМЫЙ 6				
ykv	0,306	0,320	0,174	0,358
ykv0	-0,252	-0,221	-0,016	-0,499

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При выполнении проверки на однородность обнаружено, что выборки $g_{x_i}y_i$, $g_{y_i}p_i$, $g_{x_i}p_i$ для каждого испытуемого в разных состояниях являются однородными, то есть принадлежат к одной генеральной совокупности и не могут применяться для идентификации состояний, выборки $g_{x_i}x_j$, $g_{y_i}y_j$, $g_{r_i}r_j$ являются неоднородными, что означает возможность использовать $g_{x_i}x_j$, $g_{y_i}y_j$, $g_{r_i}r_j$ в идентификации состояния субъектов. Проверка на однородность выборок для разных испытуемых в одинаковых состояниях, показала, что $g_{x_i}x_j$, $g_{y_i}y_j$, $g_{r_i}r_j$ – неоднородные, $g_{x_i}y_i$, $g_{y_i}p_i$, $g_{x_i}p_i$ – по большей части неоднородные, следовательно, данные параметры можно использовать для идентификации субъектов, находящихся в одинаковом состоянии. По полученным данным, параметры автографа $g_{x_i}x_j$, $g_{y_i}y_j$, $g_{r_i}r_j$, t (длительность реализаций), являются более устойчивыми, чем дополнительные особенности подписантов – $g_{x_i}y_i$, $g_{y_i}p_i$, $g_{x_i}p_i$.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведения обзора литературы было установлено, что состояние, в котором находится субъект, а также его изменение оказывает влияние на почерк, что может негативно сказаться на надежности распознавания по почерку. Среди упомянутых работ данный аспект не принимается во внимание. Автор предполагает, что учет состояния как во время обучения систем идентификации по подписи, так и в процессе идентификации, позволит улучшить надежность распознавания.

Полученные результаты необходимы для проведения дальнейших исследований на тему идентификации субъектов и их физиологических состояний с использованием автографа подписантов и также подводит автора к исследованию возможности обнаружения подделок автографов при использовании упомянутых параметров.

Результаты, полученные в ходе выполнения данной исследовательской работы, позволяют прийти к следующим выводам: для идентификации состояния субъектов могут применяться параметры автографа – коэффициенты корреляции координат и давления разных реализаций ($g_{x_i}x_j$, $g_{y_i}y_j$, $g_{r_i}r_j$), в то время как коэффициенты корреляции координат и давления для одинаковых реализаций ($g_{x_i}y_i$, $g_{y_i}p_i$, $g_{x_i}p_i$) не могут быть использованы с этой целью, идентификация самих субъектов возможна при использовании всех упомянутых коэффициентов корреляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-07-01204).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zecurion Analytics. Отчёт об утечках конфиденциальной информации в 2014 году. Предварительные итоги. URL: http://www.zecurion.ru/upload/iblock/fe3/Zecurion_Data_leaks_2015.pdf (дата обращения: 15.01.2015)
2. Эффект Сноудена. Методы и технологии противодействия XVMatic // Специальная техника. 2013. № 5. С. 62–63.
3. Schneier B. Secrets and lies. Digital security in a networked world. 2000. P. 412.
4. Xiao X. H., Leedham G. Signature verification by neural networks with selective attention // Appl. Intell. 1999. Vol. 11. P. 213–223.
5. Wessels T., Omlin C. W. A hybrid system for signature verification // Proc. Int. Joint. Conf. Neural netw. 2000, Como, Italy, Jul. Vol. 5. P. 509–514.
6. Yoon H. S., lee I. Y., Yang H. S. An on-line signature verification system using hidden Markov model in polar space. // In Proc. 8th Workshop front. Handwriting Recognit (IWFHQ-8), Canada, Ontario, Aug., 2012. P. 329–333.
7. Miramatsu D., Matsumoto T. An HMM on-line signature verification algorithm (lecture Notes in Computer Science 2688). In AVBPA 2003. Berlin Germany: Springer-Verlag, 2003. P. 233–241.
8. McCabe A. neural network – based handwritten signature verification // Journal of computers. 2008. Vol. 3. no. 8, P. 9–22.

9. Boshir M., Kempf F. advanced biometric pen system for recording and analyzing handwriting // Journal of Signal processing Systems. 2012. 68(1), P. 75–81.
10. Boutellaa E. Improving online signature verification by user-specific likelihood ratio score normalization // (Conf. Paper). Systems, Signal processing and their Application (WoSSPA): 8th International Workshop, 2013, P. 296–300.
11. Mahanta L. B., Alpana Deka. A Study on Handwritten Signature // International Journal of Computer Applications. 2013. Vol. 79, no. 2. P. 5.
12. Кулик С. Д., Гунько Н. Е. Анализ психологических свойств личности по почерку для обеспечения информационной безопасности // Безопасность информационных технологий. 2012. № 3. С. 103–110.
13. Бабунц И. В., Мираджян Э. М., Машаех Ю. А. Азбука анализа variability сердечного ритма, 2011
14. Fairclough S. H. [et. all.]. Driver State Monitor (Report V2009/DETER/Deliverable 5 (330A)). Haren, The Netherlands: Traffic Research Centre, University of Groningen, 1994.
15. Mascord D. J., Heath R. A. Behavioral and physiological indices of fatigue in a visual tracking task // Journal of Safety Research. 1992. Vol. 23. P. 19–25.
16. Машин В. А., К вопросу классификации функциональных состояний человека // Экспериментальная психология. 2011. Т. 4, № 1. С. 40–56.
17. Машин В. А. Трехфакторная модель variability сердечного ритма в психологических исследованиях функциональных состояний человека-оператора. (Материалы к докторской диссертации, Ред. 25.02.2010, 290 с.) URL: http://mashinva.narod.ru/arch/HRV18_4.pdf
18. Poh M.-Z. Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation. // Optic Express. 2010. Vol. 18, no. 10.
19. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.

УДК 004.056

МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Е. В. Трапезников, О. Т. Данилова

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В работе проведён анализ проблем, возникающих при построении системы защиты информации. В ходе анализа выявлены достоинства и недостатки существующих и разрабатываемых систем. В работе представлена разработка модели, анализирующей уровень защиты информации. В основе модели лежит анализ реакции системы защиты информации на дестабилизирующие факторы с применением нейронной сети, выбранной как универсальный механизм табличного задания объектной функции многих переменных с ассоциативной или ассоциативно-усреднённой выборкой. В результате работы разработано программное обеспечение, реализующее работу модели, что позволило подтвердить обоснованность выбора нейронной сети.

Ключевые слова: нейронная сеть, порог активации нейрона, функция безопасности.

I. ВВЕДЕНИЕ

Большая часть из существующих систем обнаружения атак, применяемых для мониторинга безопасности информационных систем, основана на использовании правил и сигнатур. Данный подход анализирует вектор входных данных, на основании чего делается вывод о наличии или отсутствии атаки. В работе [1] отдельно рассматривается применение данного подхода для обнаружения атак базы данных. При малейшем отклонении сигнатуры атаки от сигнатуры или правила, имеющегося в БД, эта атака обнаружена не будет. Ввиду описанных проблем автор делает вывод, что из-за большого разнообразия атак обычные системы обнаружения атак не всегда способны обеспечить идентификации атаки.

Существующие отдельные уровни защиты информации, которые успешно нейтрализует известные угрозы безопасности системы, оказываются малоэффективными при расширении поля угроз или обнаружении новых уязвимостей системы. Автор [2] указывает, что информационная безопасность систем все в большей степени обеспечивается за счет включения интеллектуальных средств в состав систем обнаружения компьютерных

атак. Придание СОА таких качеств, как адаптивность и самоорганизация, свидетельствует о новом этапе развития средств автоматизации обеспечения ИБ ТКС. Особо выделяются достоинства интеллектуальных средств защиты, а именно наличие элементов самоорганизации и эволюции, которые используются для оперативных действий в СЗИ по классификации угроз и нейтрализации последствий вторжения.

По мнению авторов [3] интеллектуальные системы не только могут использоваться для построения системы защиты, но также могут использоваться злоумышленниками для обхода систем защиты. Отмечается, что разрабатываемая ими модель строит системы защиты так, чтобы интеллектуальной системе злоумышленника было сложнее обойти системы защиты.

Положительный эффект от применения нейронной сети для защиты информации показан в работах [4, 5, 6]. Выделяется одна из наиболее существенных проблем защиты информации, а именно DDoS атаки на информационные системы и предлагают использовать нейронные сети для предупреждения и быстрого реагирования на данный вид атак [4, 6]. Автор [5] предлагает использовать нейронные сети, для подтверждения достоверности передаваемых данных. По результатам исследований автор [6] предложил интеллектуальную систему обнаружения (DoSID).

Важным этапом при анализе защиты информации является классификация уязвимостей. Авторы работы [7] рассмотрели проблему автоматической классификации уязвимостей информационных систем. В ходе работы была выявлена сложность поставленной задачи и для ее решения особо выделен математический аппарат нейронных сетей. В результате работы поставленная задача решена, чему послужило разработка соответствующего программного обеспечения.

В работе приводится диаграмма Эйлера–Венна для задачи классификации уязвимостей, представленная на рис. 1.

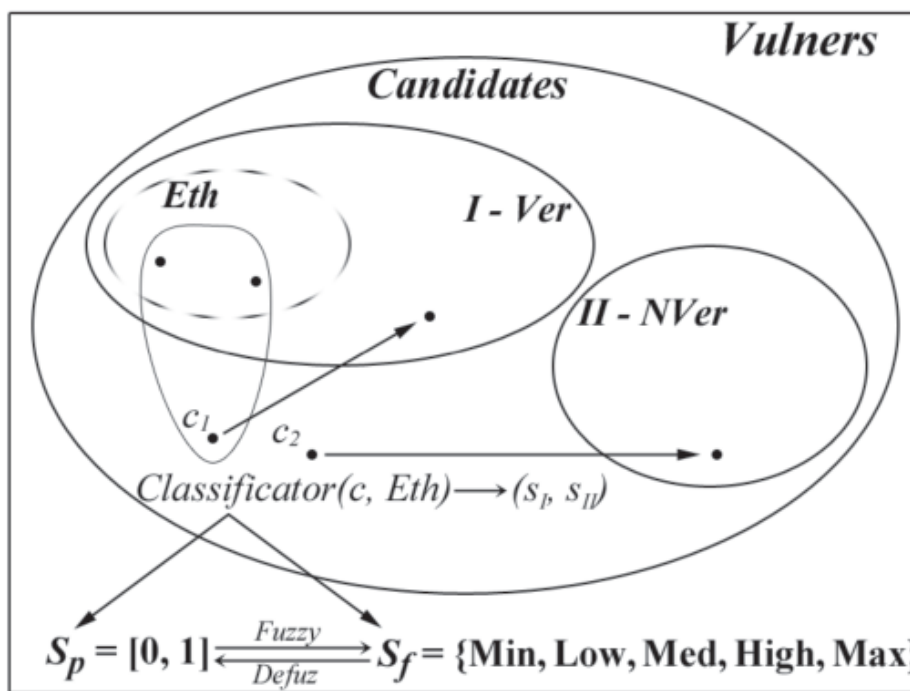


Рис.1. Диаграмма Эйлера – Венна для задачи классификации уязвимостей

Анализ системы защиты является частью общей системы защиты. Авторы [8] в своей работе предложили структуру системы управления инцидентами информационной безопасности, в основу которой положены методы имитации интеллектуальной деятельности человека, направленные на обработку сведений, полученных от сотрудников или администраторов

В работах [9, 10] нейронная сеть рассматривается как главный инструмент в обнаружении атак на информационные системы.

Проведённый анализ показывает, что использование нейронных сетей затрагивает большинство сфер интересов информационной безопасности. Нейронные сети стали новым средством противодействия компьютерным угрозам.

Основываясь на проведённом анализе существующих средств защиты информации, было выявлено, что создание модели, анализирующей функции безопасности в системе защиты информации с помощью интеллектуальных систем, является актуальным и составляет цель настоящего исследования

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Учитывая, что задача моделирования в сфере защиты информации не характеризуется строгими математическими зависимостями между компонентами, исходные данные зачастую несовместимы по типам, размерности, а принимаемые решения зачастую основываются на неполной, противоречивой информации.

Указанные факторы приводят к необходимости имитации ассоциативного мышления, к моделированию методов искусственного интеллекта, основным средством которого являются нейронные сети.

Одним из основных преимуществ искусственных нейронных сетей (ИНС) является нелинейность нейронных сетей, что представляет собой метод моделирования, позволяющий устанавливать чрезвычайно сложные зависимости. Нейронные сети позволяют решать «проблему» размерности, которая не позволяет моделировать линейные зависимости для большого числа переменных.

III. ТЕОРИЯ

Построение моделей системы безопасности информации, предполагает первоначальное проведение анализа потенциальных дестабилизирующих факторов (ДФ), воздействующих на систему обработки информации.

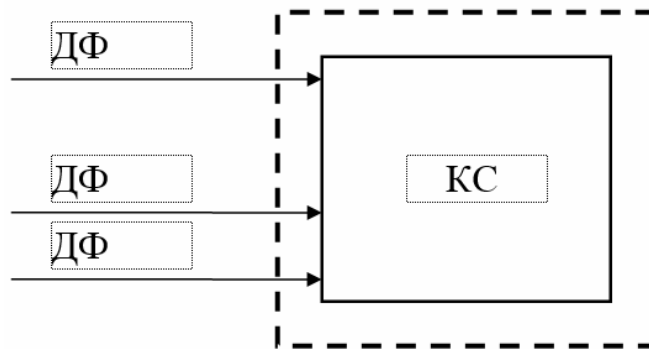


Рис. 2. Воздействие дестабилизирующих факторов

Анализ воздействия дестабилизирующих факторов, в свою очередь, включает составление полного (насколько это возможно) перечня потенциальных угроз и исследования возможности их воздействия на систему обработки информации.

Определим, что в качестве входных данных будет являться совокупность ДФ

$$S = \{s_1, \dots, s_N\}.$$

Запишем уравнения реакции моделируемой системы защиты:

$$\begin{aligned} F_1(X_1, \dots, X_N) &= Y_1 \\ \dots & \\ F_S(X_1, \dots, X_N) &= Y_S \end{aligned}$$

где $X_i = x(s_i)$, $i = 1, \dots, N$, логическая переменная – высказывание о наступлении события; F_j , $j = 1, \dots, S$, логическая функция указанных переменных – высказываний, значение ИСТИНА которой определяет принимаемое решение Y_j .

Затем следует построение граф-схемы выполнения системы логических функций (рис. 1). Вершины $1 - k$ этого графа соответствуют логическим элементам – конъюнкторам, а вершины $Y_1 - Y_S$ – дизъюнкторам. Построенная схема отображает функционально законченное устройство. На основе граф-схемы строится нейронная сеть. Вершины $X_1 - X_N$ соответствуют нейронам-рецепторам входного слоя.

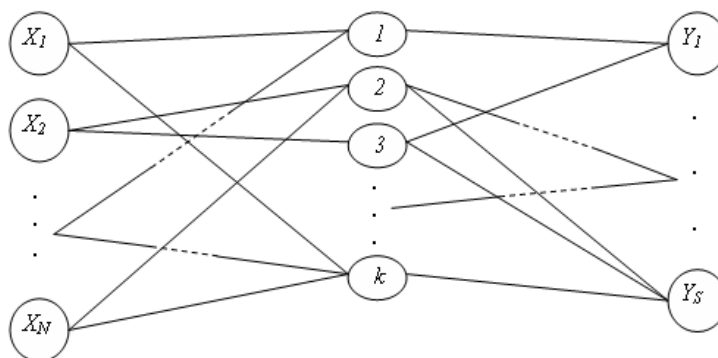


Рис. 3. Граф-схема выполнения системы логических выражений (И–ИЛИ сеть)

В нейронной сети вершины $\{1, \dots, k\}$ обозначают нейроны промежуточного или скрытого слоя. Нейроны $Y_1 - Y_S$ образуют выходной слой; их возбуждение указывает на принимаемое решение. На вход искусственного нейрона поступает некоторое множество сигналов, каждый из которых является выходом другого нейрона.

Каждый сигнал умножается на соответствующий вес и поступает на суммирующий блок. Суммирующий блок, соответствующий телу биологического элемента, складывает взвешенные входы алгебраически, создавая выход, который обозначается NET.

$$NET = \sum_{i=1}^n x_i w_i .$$

Сигнал NET преобразуется активационной функцией F и дает выходной нейронный сигнал OUT.

Для выбора передаточной функции и порога активации нейрона h следует руководствоваться следующими требованиями:

- эти функции в области преодоления порога должны быть монотонно возрастающими по каждому сигналу на входе нейрона;
- не должно быть «угасания» сигнала возбуждения при его прохождении по сети;
- сигналы возбуждения на выходном слое должны быть четко различимы по величине для различных эталонных ситуаций;
- должен быть примерно равным диапазон изменения величин возбуждения нейронов выходного слоя, закрепленных за разными решениями.

Для решения задачи используем следующую, определяющую величину V возбуждения нейрона в зависимости от величин V_i возбуждения связанных с ним нейронов, весов ω_i этих связей, а также порога h :

$$V := \sum_i \omega_i V_i;$$

$$V := \text{if } V > h \text{ then } V \text{ else } 0.$$

Чтобы нейрон приходил в возбужденное состояние после прихода сигнала, ему необходимо задать высокий порог активации. При этом необходимо так подобрать пороги для всех нейронов, прообразами которых являются конъюнкторы, чтобы «нужные» нейроны возбуждались, а «побочные эффекты» исключались. Это требование приводит к важной исходной предпосылке создания нейросети, основанной на понятии существенности события.

На этапе проектирования нейросети выбирается некоторое значение предпочтительной достоверности N . И тогда событие является существенным, если его достоверность не ниже значения N . При проектировании нейросети учтено, что событие является существенным, если его достоверность не ниже некоторого значения достоверности порога активации нейрона h .

На последнем этапе для решения поставленной задачи необходимо применить один из алгоритмов обучения. Чтобы полученная сеть решала задачу нахождения «связей» между элементами из X и Y , необходимо изменить начальные веса. В этом и заключается процесс обучения сети – изменение весов связей в контексте конкретной задачи. В нашем случае известно несколько ситуаций (наборов из X), при которых необходимо выполнить определенное действие (конкретный элемент из Y). Таким образом, нам подходит один из алгоритмов обучения с учителем, а именно самый распространенный – «алгоритм обратного распространения ошибки».

Процесс обучения начинается после задания начальных значений весов сети. В общем случае они могут быть произвольными, например, нулевыми. При наличии априорной информации об особенностях процесса обучения, начальные значения весов могут выбираться из каких-либо дополнительных соображений. Процеду-

ра повторяется для всего обучающего множества до тех пор, пока ошибка по всему обучающему множеству не достигнет приемлемо низкого уровня.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки работы модели, анализирующей информационную защиту систем, было разработано программное обеспечение.

Общий вид работы программного обеспечения приведён на рисунке 4 в виде блок-схемы.

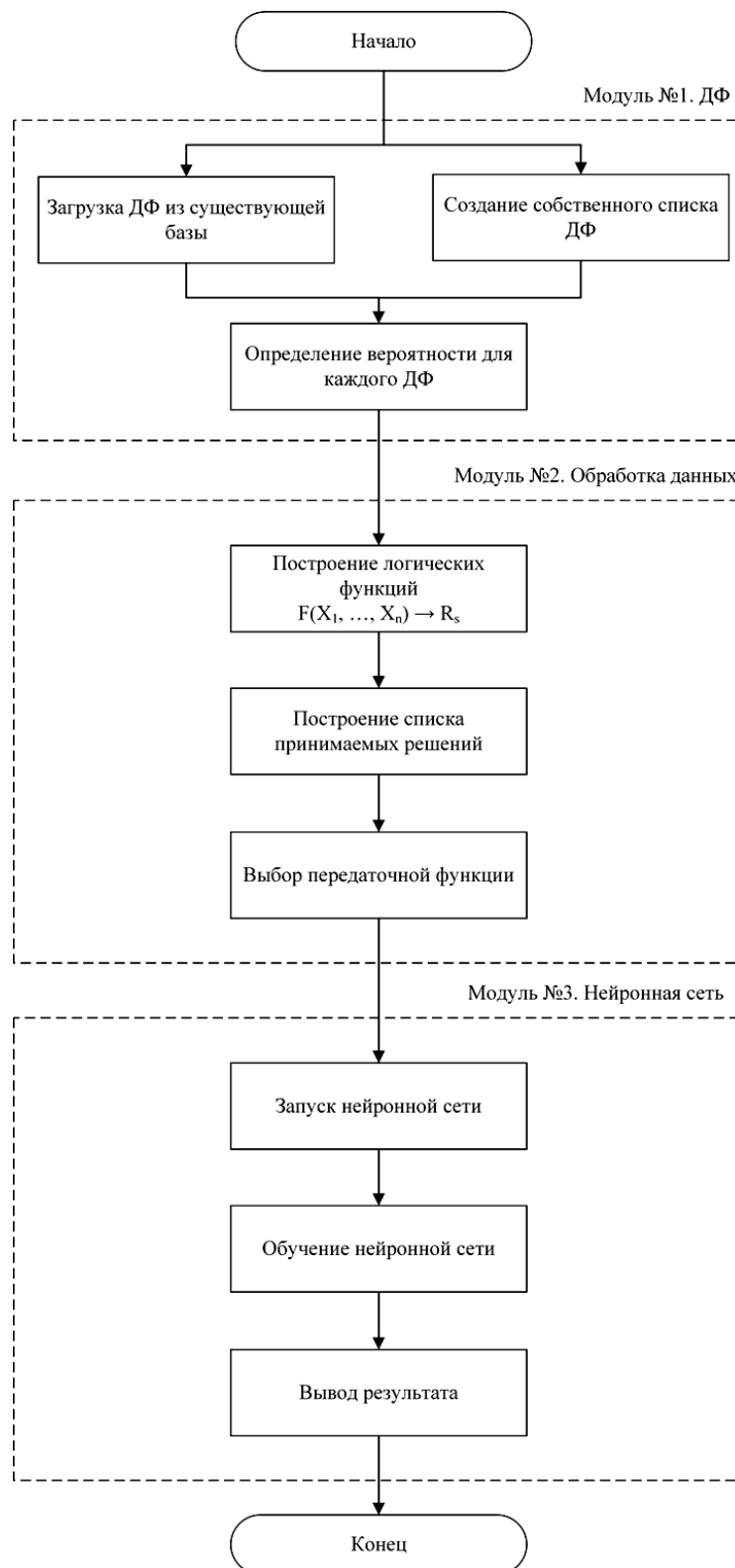


Рис. 4. Выборка результатов испытаний

Разработанное программное обеспечение работает по следующему алгоритму:

- 1) предлагается ввести набор дестабилизирующих факторов либо осуществить выбор из представленного списка факторов;
- 2) для каждого дестабилизирующего фактора необходимо задать вероятность совершения события;
- 3) следующим этапом идет построение логических функций и списка принимаемых решений. Логические функции строятся на основе дестабилизирующих факторов. Для каждой функции задается порог активации нейрона входного слоя;
- 4) на этапе задания решений также выбирается из списка фактор, после задается порог активации нейрона выходного слоя;
- 5) последним этапом служит запуск нейронной сети и ее обучение;
- 6) обученную нейронную сеть предполагается использовать для следующих запусков при новом анализе безопасности информационной системы.

Краткая выборка результатов тестовых испытаний представлена на рис. 5. Для проведения тестовых испытаний были выбраны гипотетическая информация с существующей системой защиты и набор дестабилизирующих факторов для оценки степени защищенности системы.

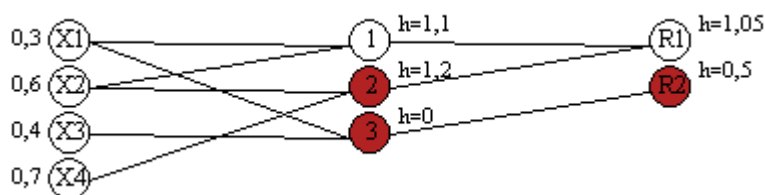


Рис. 5. Выборка результатов испытаний

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализа работы модели, анализирующей функции безопасности позволяет оценить построенную нейросеть. После запуска модели и анализа списка событий выстроилась последовательность нейронов, моделирующих конъюнкции и дизъюнкции. Нейроны, отвечающие за элементы, входящие в конкретную конъюнкцию, соединяются прямыми с нейроном этой конъюнкции. Аналогично соединяются конъюнкции с нейроном дизъюнкции. Нейрон, чей уровень возбуждения больше порога h_i , выделяется закрашенным бордовым цветом. Нейроны выходного слоя, которые окрашены в бордовый цвет и являются теми решениями, которые необходимо принять.

В результате эксперимента установлено, что последующие запуски сформированной нейронной сети позволяют накапливать статистику, продолжать обучение нейронной сети, а также повышать качество принимаемых решений обученной нейронной сети.

Следует отметить, что при увеличении числа дестабилизирующих факторов необходимо дополнительно проводить обучение нейронной сети на основе весовых коэффициентов новых факторов. Увеличение числа дестабилизирующих факторов позволяет расширить возможности нейронной сети по анализу безопасности различных информационных систем.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отличительной особенностью разработанной модели, анализирующей функции безопасности в системе информационной защиты, на основе нейронной сети являются возможность повышения уровня оценки защищенности информационной системы и принятие необходимых мер реагирования. Использование данной модели должно позволить оперативно изменять составляющие системы информационной безопасности.

В результате исследований продемонстрирована обоснованность выбора нейронной сети. Разрабатываемый программный комплекс позволит:

- а) составлять перечень дестабилизирующих факторов;
- б) строить логические функции и списки принимаемых решений;
- г) строить структуру для обучения нейросети;
- д) выводить результат (полученное решение).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочеткова А. С. Применение нейронных сетей для мониторинга безопасности информационных систем // Вестник ВолГУ. Сер. 9. Исследования молодых ученых. 2007. № 6 С. 163–167.
2. Сумкин К. С., Тверской А. Н., Морозова Т. Ю. Метод интеллектуальной поддержки принятия решений в задачах идентификации компьютерных атак // Доклады ТУСУР. 2012. № 1–2 (25) С. 69–73.

3. Булдакова Т. И. Нейросетевая защита ресурсов автоматизированных систем от несанкционированного доступа // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 5. С. 269–278.
4. Saied A., Overill R. E., Radzik T. Detection of known and unknown DDoS attacks using Artificial Neural Networks // Neurocomputing. 2016. 172. С. 385–393.
5. Igor H. [et all.]. Application of Neural Networks in Computer Security // Procedia Engineering. 2014. 69. С. 1209–1215.
6. Alfantookh A. A. DoS Attacks Intelligent Detection using Neural Networks // Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. 2006. Vol. 18. P. 31–51.
7. Гильмуллин Т. М., Гильмуллин М. Ф. Подходы к автоматизации процесса валидации уязвимостей, найденных автоматическими сканерами безопасности, при помощи нечётких множеств и нейронных сетей // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-2.
8. Заводцев И. В., Гайнов А. Е., Ржевский Д. А. Интеллектуальные системы управления инцидентами информационной безопасности // Перспективы развития информационных технологий. 2015. № 24.
9. Ahmad I., Abdullah A., Alghamdi A. S. Application of artificial neural network in detection of probing attacks // Industrial Electronics & Applications, 2009. ISIEA IEEE Symposium on, Kuala Lumpur, 2009. P. 557–562. doi: 10.1109/ISIEA.2009.5356382.
10. Mukhin V., Kornaga Y., Steshyn V., Mostovoy Y. Adaptive security system based on intelligent agents for distributed computer systems // International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, 2016. P. 320–325. doi: 10.1109/DAAS.2016.7492595.

УДК 004.85

ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЕТКОГО КЛАССИФИКАТОРА СЕТЕВЫХ АТАК НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

И. А. Ходашинский, М. А. Мех

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Россия*

Аннотация – Целью работы является описание метода построения систем распознавания сетевых атак на базе эффективного нечеткого классификатора, параметры которого оптимизированы алгоритмом дифференциальной эволюции, а отбор информативных признаков осуществлялся алгоритмом бинарного гармонического поиска. Эффективность разработанных нечетких классификаторов исследована на наборе данных KDD Cup 1999. Выбор оптимального классификатора выполнялся с помощью критерия Акаике. Оптимально построенная система распознавания имеет ошибку первого рода 1.21% и ошибку второго рода 0.39%.

Ключевые слова: образец, оформление, статья.

1. ВВЕДЕНИЕ

Передача данных по сетевым коммуникациям стала неотъемлемой составляющей функционирования большинства информационных систем как на уровне организаций, так и на уровне рядовых пользователей. Одновременно с ростом популярности использования сетевых коммуникаций возросло и количество сетевых угроз работоспособности системы, конфиденциальности и целостности обрабатываемой информации.

Выявление атак в сетевом трафике осуществляют системы классификации, распознающие трафик по некоторому набору признаков и относящие соединение к классу атаки или нормального соединения. Системы распознавания могут быть построены на базе различных методов, таких как классификатор Байеса, метод опорных векторов, метрический классификатор, нейронные сети и нечеткие системы.

Основным преимуществом нечетких систем, в отличие от аналогов, является простота интерпретации полученного результата, что повышает доверие к системе и упрощает обнаружение ошибок построения и их последующую корректировку [1].

Целью работы является описание метода построения систем распознавания сетевых атак на базе эффективного нечеткого классификатора.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется универсум $U = (A, C)$, где $A = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – множество входных признаков, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – множество классов. Пусть $\mathbf{X} = x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n \in \mathcal{R}^n$ n -мерное пространство признаков. Объект u в заданном универсуме характеризуется своим вектором признаков. Задача классификации заключается в предсказании класса объекта u по вектору его признаков.

Нечеткий классификатор может быть представлен в виде функции, которая присваивает точке в пространстве входных признаков метку класса с вычисляемой степенью уверенности:

$$f : \mathcal{R}^n \rightarrow [0,1]^m .$$

Основой нечеткого классификатора является продукционное правило следующего вида:

$$R_{ij} : \text{ЕСЛИ } x_1=A_{1i} \text{ И } x_2=A_{2i} \text{ И } x_3=A_{3i} \text{ И } \dots \text{ И } x_n=A_{ni} \text{ ТО class}=c_j,$$

где A_{ki} – нечеткий терм, характеризующий k -й признак в i -м правиле ($i \in [1, R]$), R – число правил.

В нашей работе класс определяется по принципу «команда победителей получает всё»:

$$\text{class} = c_{j^*}, \quad j^* = \arg \max_{1 \leq j \leq m} \beta_j,$$

$$\beta_j(\mathbf{x}) = \sum_{R_{ij}} \prod_{k=1}^n A_{ki}(x_k), \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Пусть имеется таблица наблюдений $\{(\mathbf{x}_p; c_p), p = 1, \dots, z\}$, определим следующую единичную функцию

$$\text{delta}(p, \Theta) = \begin{cases} 1, & \text{если } c_p = f(\mathbf{x}_p, \Theta) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad p = 1, 2, \dots, z,$$

тогда функция пригодности или мера точности классификации может быть выражена следующим образом:

$$E(\Theta) = \frac{\sum_{p=1}^z \text{delta}(p, \Theta)}{z} .$$

Проблема построения нечеткого классификатора сводится к поиску максимума указанной функции в пространстве параметров классификатора $\Theta = \|\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^D\|$:

$$\max(E(\Theta)), \quad \theta^i \in \{ \theta^i : \theta_{min}^i < \theta^i < \theta_{max}^i, i = 1, 2, \dots, D \},$$

где θ^i – значение параметра θ^i из интервала $[\theta_{min}^i, \theta_{max}^i]$, $\theta_{min}^i, \theta_{max}^i$ – нижняя и верхняя границы каждого параметра соответственно.

Для оптимизации параметров Θ предлагается использовать метод дифференциальной эволюции. Для отбора признаков используется бинарный алгоритм гармонического поиска.

III. ТЕОРИЯ

13. Алгоритм дифференциальной эволюции

Алгоритм дифференциальной эволюции относится к классу эволюционных метаэвристик [2], задается следующими параметрами: N – количество итераций; S – количество хромосом в популяции; Cr – вероятность выполнения кроссовера; F – коэффициент, используемый для генерации новой хромосомы.

Псевдокод алгоритма для оптимизации параметров нечеткого классификатора приведен ниже.

Вход: N, S, F

Выход: Θ_{best} .

$Popul := \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_S\};;$

цикл пока ($N > 0$)

цикл по p от 1 до S

$\theta_{cur} := Popul[p];$

$\theta_a, \theta_b := \text{Random_choose}(Popul);$

$\theta_{best} := \text{Search_best}(Popul);$

$CR := \text{rand}(0.1);$

цикл по d от 1 до $|\theta_i|$

```

        если (rand(0.1) < CR) то
             $\theta_{new}[d] := \theta_{best}[d] + F * (\theta_a[d] - \theta_b[d]);$ 
        иначе  $\theta_{new}[d] := \theta_{cur}[d];$ 
    конец цикла
    если ( $E(\theta_{new}) < E(\theta_{cur})$ ) то
         $\theta_{cur} := \theta_{new};$ 
    N := N - 1;
конец цикла
конец цикла
вывод  $\theta_{best} := \text{Search\_best}(\text{Popul}).$ 

```

14. Бинарный алгоритм гармонического поиска

Алгоритм гармонического поиска относится к группе метаэвристических алгоритмов оптимизации [2]. Бинарный гармонический поиск имеет следующие параметры: $HMCR, PAR \in [0,1]$ константы, используемые для создания нового вектора; HMS – размер гармонической памяти; N – количество итераций.

Псевдокод алгоритма, адаптированный для задачи отбора признаков нечеткого классификатора, приведен ниже.

Вход: $N, HMCR, PAR.$

Выход: A_{best}

```

     $HM := \{A_1, A_2, \dots, A_{HMS}\};$ 
    цикл пока ( $N > 0$ )
         $A_r := \text{Random\_choose}(HM)$ 
        цикл по  $d$  от 1 до  $N$ 
            если (rand(0.1) <  $HMCR$ ) то
                 $A_{new}[d] := A_r[d]$ 
            если (rand(0.1) <  $PAR$ ) то
                 $A_{new}[d] := A_r[d]$ 
            иначе если (rand(0.1)  $\leq 0.5$ ) то
                 $A_{new}[d] := 0;$ 
            иначе  $A_{new}[d] := 1;$ 
        конец цикла;
        если ( $E(A_{new}) > E(A_{worst})$ ) то
             $A_{worst} := A_{new};$ 
        N := N - 1;
    конец цикла;
    вывод  $A_{best} := \text{Search\_best}(HM).$ 

```

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проверка эффективности нечеткого классификатора, построенного по указанным алгоритмам, проводилась на наборе данных KDD Cup 1999 [3], который содержит 41 признак, характеризующий сетевые соединения, включающие 23 класса сетевых атак и класс нормального соединения.

На наборе данных KDD Cup 1999 было сформировано несколько классификаторов сетевых атак, характеризующихся количеством используемых признаков, точностью на обучающих данных и тестовых данных, а также ошибками первого и второго рода. Результаты работы пяти нечетких классификаторов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ НЕЧЕТКИХ КЛАССИФИКАТОРОВ

Характеристики	Номер классификатора				
	1	2	3	4	5
Число признаков F_S	24	19	17	22	10
Процент правильно классификации на обучающей выборке	98.74	99.1	97.85	98.27	98.94
Процент правильно классификации на тестовой выборке	98.71	99.08	97.84	98.25	99.05
Ошибка первого рода ER_1	1.58	1.06	1.01	1.14	1.21
Ошибка второго рода ER_2	0.12	0.36	6.87	4.25	0.39

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для определения оптимального классификатора был использован критерий Акаике AIC [4], адаптированный под решаемую задачу:

$$AIC = \ln(ER_1 + k \cdot ER_2) + \frac{2}{m}(1 + Fs)$$

где m – количество сравниваемых классификаторов, k – коэффициент, определяющий приоритет ошибки второго рода относительно первого; в эксперименте значение коэффициента k было равно 2. Исходя из заданного критерия, оптимальным является классификатор под номером 5.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод построения нечеткого классификатора сетевых атак, включающий алгоритм отбора классифицирующих признаков, алгоритм оптимизации параметров нечеткого классификатора и критерий выбора оптимального классификатора. Экспериментальное исследование на наборе данных KDD Cup 1999 Data. Результаты эксперимента показали практическую пригодность разработанного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hodashinsky I. A., Gorbunov I. V. Algorithms of the tradeoff between accuracy and complexity in the design of fuzzy approximators // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2013. Т. 49, no. 6. С. 569–577.
2. Yang X.-S. Nature-Inspired Optimization Algorithms. USA: Elsevier Inc., 2014. 258 p.
3. KDD Cup 1999. URL: <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html>, May 2016.
4. Akaike H. A. New Look at the Statistical Model Identification // IEEE Transactions on Automatic Control, AC19. 1974. P. 716–723.

УДК 004.49, 004.6

ЗАЩИТА ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСОВ МЕТОДОМ КОНТРОЛЬНЫХ СУММ

Б. С. Яковлев, Н. Е. Проскуряков

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Аннотация – Анализ угроз кражи личных данных и заражения сайтов показал, что антивирусные средства для сайтов малоэффективны, хостинги не проводят постоянный контроль за вирусами на своих серверах из-за больших объемов данных пользователей, а RAID-массивы не могут спасти данные, т.к. они всего лишь их дублируют и в случае заражения запоминают измененный вирусом файл. Нами разработаны метод и программное обеспечение, повышающие эффективность технологии проверки сайтов в сети Интернет. Программное обеспечение работает по принципу проверки контрольных сумм и сравнение образцовой копии сайта владельца с данными, размещенными на сервере, с отслеживанием и восстановлением удаленных или измененных файлов. Данный метод проверяет на заражение архивы, графику, документы и мультимедийные данные, что не умеют делать существующие способы проверки.

Анализ скорости проверки данных сайта показал, что при отсутствии заражения файлов на сервере скорость сравнения контрольных сумм в 3...4 раза больше, чем в ситуации, когда файлы отсутствуют или были заражены. В случае отсутствия файлов на сервере скорость проверки данных примерно равна скорости их прямой загрузки на сервер, т.е. реальной скорости работы Интернет-соединения. При заражении файлов время проверки увеличивается примерно в 1,5 раза. В случае организации длительного хранения оцифрованных данных на WEB-сервере или локальной сети рекомендуется использовать только бинарный способ записи файлов. Метод борьбы с вирусными угрозами для Интернет-ресурсов, основанный на проверке контрольных сумм, показывает хорошие результаты и может применяться для этих задач.

Ключевые слова: FTP-соединение, WEB-сервер, проверка контрольных сумм, бинарный файл, CRC, защита данных, сайт, алгоритм, вирусное заражение.

I. ВВЕДЕНИЕ

В классическом виде WEB-сервер представляет собой «серверный шкаф», состоящий из отдельных ячеек, оснащенных управляющей платой, жесткими дисками и LAN. В управляющую плату вшита ОС Linux, т.к. эта система на протяжении всех лет существования показывала высокую стойкость к заражению вирусами. Именно поэтому все заражения сайтов проходили относительно безвредно. Кроме того, по статистике большинство заражений происходили исключительно по вине разработчиков сайтов или безответственных владельцев, а не заражения хостинга.

Потеря файлов с появлением и внедрением на сервере RAID-массивов стала почти невозможна. Поэтому сейчас существует отлаженная система хранения файлов на сервере, позволяющую почти на 100% защитить данные от потери. К сожалению, массивы не защищают от заражения, т.к. в случае изменения файлов RAID-массив надежно запомнит их, но не сможет восстановить.

Защита данных от вирусных атак со стороны сервера – почти невыполнимая задача, связанная с тем, что на сервере не может работать и обновляться антивирус как на обычной ЭВМ в силу своей конфигурации и задачи. Большинство фирм, работающих на рынке Интернет-услуг, имеют огромные объемы данных, и проверять файлы пользователей обычным монитором антивируса в реальном времени они просто не в состоянии [1–2].

Ситуация не критична, но если администрация сайта не будет следить за своим ресурсом, то это почти наверняка приведет к его заражению, могут пострадать посетители, и в итоге это может привести к краже личных данных, электронных денег, или денежным затратам на восстановление данных.

Под действием этих факторов в современных реалиях стали быстро появляться и развиваться «антивирусы для сайтов». Обычно их делят на два варианта работы:

- проверка сайта на уязвимость при помощи онлайн сервисов;
- проверка файлов сайта на вредоносный код при помощи встраиваемой страницы, написанной на любом приемлемом серверном языке.

Первая категория известными запросами проверяет сайт на устойчивость и уязвимость, что в итоге может дать хорошую информацию о безопасности выбранного поставщика услуг по размещению сайта в Интернет. Однако она бесполезна, с точки зрения обнаружения самих вирусов на сайте, т.к. внешние сайты не могут получать содержимое PHP, ASP файлов. Они могут анализировать только итог их работы, тот результат, который выдает сервер после их выполнения.

Что касается второго варианта проверки сайтов непосредственно на вирусы, то он тоже далек от идеала. Его реализация осуществляется за счет запуска «секретной» страницы на сайте вручную или по таймеру. Ее задача сводится к опросу всех файлов циклом на поиск известных на сегодняшний день вирусных записей.

Однако, возникают 3 проблемы:

1. Таймеры в серверных языках программирования не работают, пока не запущена страница с этим кодом, а значит, мы, не прибегая к платным сервисам, не сможем автоматизировать запуск подобных решений. Поэтому надо либо держать открытой данную страницу всегда, либо использовать платные сервисы, с проверкой файлов сайтов по расписанию, которых в сети Интернет много.

2. Сами страницы «антивируса» могут стать разносчиками вредоносного кода по сайту, т.к. могут заразиться и содержать в себе функцию, которая каждый раз при опросе любого файла на сайте применяет к нему замену стандартных тегов на вредоносный код. Это будет катастрофой для сайта, т.к. в этом случае будут опрошены все важнейшие сценарные файлы на сервере, и они заразятся.

3. Вирусы могут содержаться не только в кодах страниц сайта. Базы данных, файлы архивов, графические данные могут быть заражены. Эти файлы WEB-антивирусы проверить не смогут, т.к. они не работают с бинарными файлами и не могут проверить занесенные в базы данных записи.

Чаще всего разработчики не пишут сайт с нуля, а адаптируют уже известные разработки под потребности заказчиков. С точки зрения защиты информации, подобная тенденция крайне опасна, т.к. популярные системы управления сайтами (CMS, движок для сайта) как раз являются самыми заражаемыми ресурсами в сети Интернет, т.к. имеют открытый код, известную базовую структуру каталогов и размещение файлов, даже названия файлов одинаковы [3].

Кроме того, в подобных системах применяются одинаковые настройки безопасности, а также методы передачи данных, например, между базами данных и PHP сценариями и т.п. Таким образом, можно сказать точно, что если сохранять базовые настройки для подобных CMS, то это будет всегда приводить к повторному заражению ресурса.

В связи с этим задача защиты файлов на сайте – это крайне актуальная задача и к сожалению, в текущих условиях она должна решаться администрацией сайта [4].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с описанными выше трудностями защиты данных ставится задача создания универсального инструмента по проверке файлов сайтов с постоянным контентом на вирусы. При этом подобное программное обеспечение должно обладать рядом обязательных характеристик и свойств:

- метод проверки должен быть независим от внешних обстоятельств и по возможности не использовать шаблоны при поиске вредоносного кода;
- программа не должна ориентироваться только на разработчиков сайтов, должен учитываться факт того, что ею будут пользоваться совершенно разные по уровню знаний пользователи;
- в ней должен быть реализован механизм, позволяющий производить проверку по требованию, а также циклично через заданный промежуток времени;
- по итогу программа должна иметь возможность создавать отчет о своей работе с сообщением времени и даты тех или иных событий.

III. ТЕОРИЯ

Для решения проблем, выявленных в ходе анализа, можно предположить, что от вирусных атак, направленных на шифрование, изменение или уничтожение файлов, помогут только технологии управления (Version Control System, VCS или Revision Control System) и сетевые хранилища от Яндекс, Mail.ru, Google Диск и т.п. При этом более правильным решением является использовать Google Диск совместно с Google Drive, который автоматически синхронизирует данные из каталога файлов пользователя со своим облачным хранилищем и не только сохраняет изменения в нем, но и ведет контроль версий файлов [1, 3].

Проблемы онлайн-антивирусов и отсутствие постоянной проверки со стороны хостингов можно решить несколькими способами:

- Постоянно визуально проверять состояние и поведение сайта в Интернет частыми захода на него;
- Как угодно часто загружать файлы с сайта к себе на PC во временную директорию и проводить проверку антивирусной программой. При обнаружении угроз перезаписывать данные, содержащиеся на сервере незараженными копиями;
- Сверять файлы на сервере с копиями на жестком диске владельца сайта.

Результат заражения вирусами визуально выявляется быстрее, чем обход всех файлов программным образом, но он не может быть автоматизирован, а значит, и не может относительно часто применяться, что делает его практически бесполезным.

Второй способ более действенен, но требует больших временных затрат и, что более важно, очень сильно связан с реакцией на зараженный файл со стороны вашего антивируса. Известно, что корпорации ESET и KasperskyLab при обнаружении зараженного файла вирусами перенаправления удаляют или перемещают эти файлы, не производя их лечения. Dr.WEB более лоялен и производит автоматическое лечение этих файлов. Но данный способ все равно содержит один явный проблемный пункт – антивирусные системы не распознают источник заражения, т.е. само тело вируса, т.к. для них это обычный код страниц Интернет. Данную проблему вручную решает сам человек.

Третий способ подразумевает использование проверки контрольных сумм файлов (CRC). Он более универсален, т.к. может быть применен в большинстве случаев, не зависит от описаний вирусных сигнатур в базах антивирусных программ и, главное, может обезвредить тело вируса, потому что в случае заражения файлов на сервере код так или иначе изменит размер файла.

Исходя из представленных рассуждений можно сделать вывод, что наиболее действенным способом проверки файлов WEB-серверов на вирусы станет проверка контрольных сумм.

Программным образом получить CRC по запросам к файлам по FTP невозможно. Поэтому можно предложить 2 альтернативных способа проверки:

1. Опрос файлов сервера средствами серверных языков (PHP, ASP).
2. Последовательная загрузка файлов с сервера на PC и проверка контрольных сумм файлов.

Первый способ будет работать более быстро, но в нем заложены некоторые недостатки: при осуществлении такого опроса сам файл может стать переносчиком заражения, и при этом есть вероятность ошибки определения контрольной суммы из-за разницы файловой системы UNIX с пользовательской (чаще всего FAT32, NTFS).

Поэтому предлагается использовать последний вариант. Чтобы избежать ошибки определения контрольной суммы предполагается загрузка файлов с сервера на PC пользователя, последующее сравнение суммы с копией файлов сайта.

С этой целью была разработана программа на языке C#, выполняющая данные действия в ручном режиме (одноразовая проверка по требованию пользователя), схема алгоритма которой представлена на рис. 1.

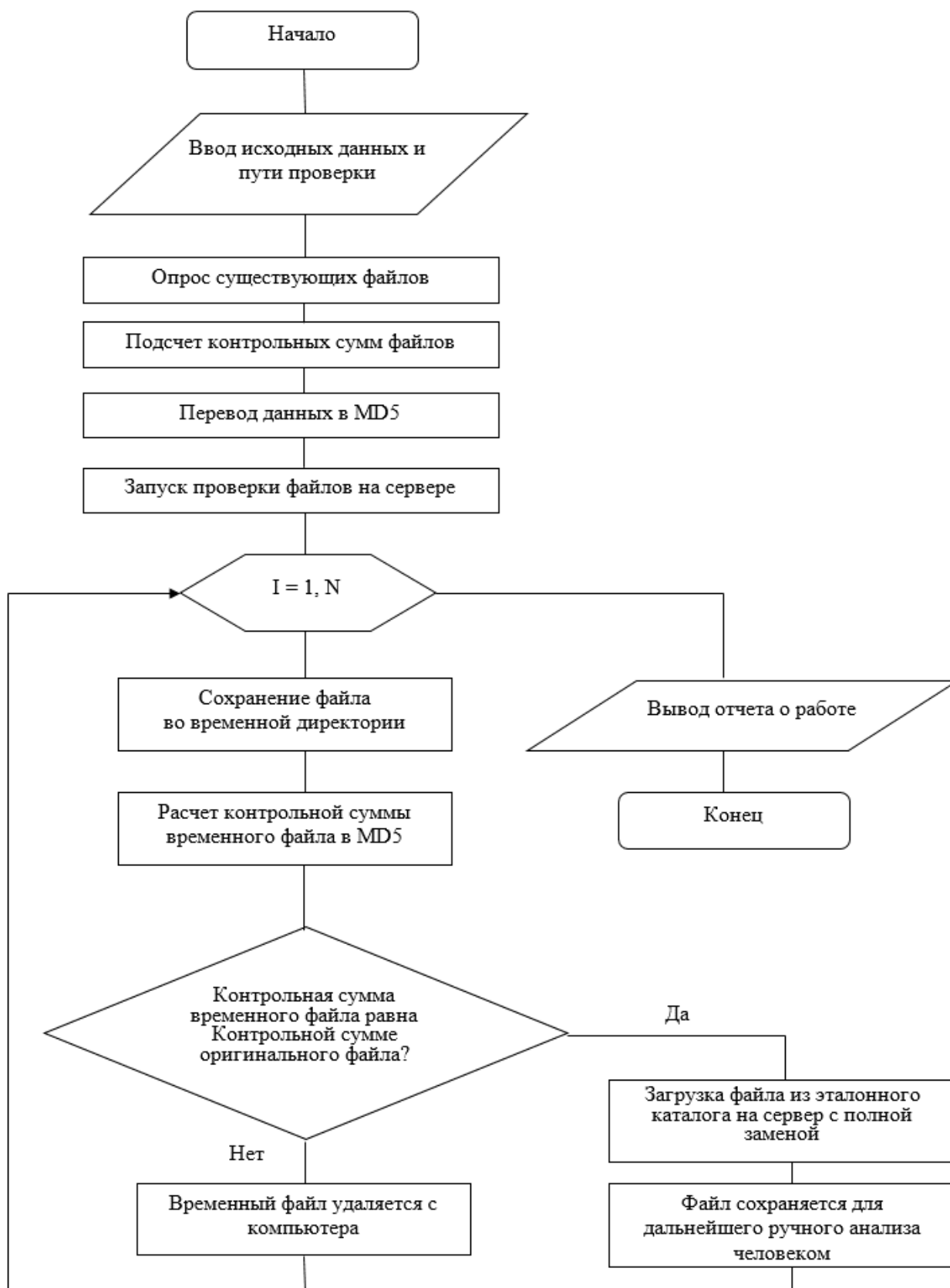


Рис. 1. Укрупненная схема алгоритма работы программы в ручном режиме

В случае активации автоматического режима работы программного обеспечения (ПО) будет повторять запуск проверки файлов на сервере через заданное пользователем время. Если же был активирован ручной режим, то по окончании проверки остановится. По окончании проверки можно просмотреть сохраненный отчет работы.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Разработаны метод и ПО, повышающие эффективность технологии проверки сайтов в сети Интернет. ПО работает по принципу проверки контрольных сумм и сравнение образцовой копии сайта владельца с данными, размещенными на сервере, с отслеживанием и восстановлением удаленных или измененных файлов. Данный метод проверяет на заражение архивы, графику, документы и мультимедийные данные, что не умеют делать существующие способы проверки.

Анализ скорости проверки данных сайта показал, что при отсутствии заражения файлов на сервере скорость сравнения контрольных сумм в 3...4 раза больше, чем в ситуации, когда файлы отсутствуют или были заражены. В случае отсутствия файлов на сервере скорость проверки данных примерно равна скорости их прямой загрузки на сервер, т.е. реальной скорости работы Интернет-соединения. При заражении файлов время проверки увеличивается примерно в 1,5 раза.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанное ПО было использовано для контроля целостности файлов на сайте тематических серий журналов «Известия Тульского государственного университета» («Известия ТулГУ»).

В ходе работы было выявлено, что вирусы или ошибки WEB-сервера могут приводить к удалению файлов с сайта. Встречались случаи обнаружения сбойных файлов, когда происходил разрыв соединения с сетью. Предложенный метод и разработанное ПО справляются с данными проблемами.

Используя результаты предыдущих исследований [5], проведены эксперименты для изучения зависимости времени проверки от объемов данных и степени их заражения, результаты которых приведены в табл. 1. В качестве испытуемого файла использовался архив из разных типов контента (текст, аудио- и видеофайлы, EXE-файлы и пр.), разбитый на части по 100 Мб. Определялось время проверки данных объемом 100 Мб, 500 Мб и 1 Гб.

ТАБЛИЦА 1

ВРЕМЯ ПРОВЕРКИ КОНТРОЛЬНЫХ СУММ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЪЕМОВ ФАЙЛОВ

Объем файла	Время проверки контрольных сумм, с					Среднее значение
	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5	
Заражение отсутствует						
100 Мб	16	15	15	17	15	16
500 Мб	84	83	84	85	84	84
1 Гб	161	162	161	161	163	161
Файлы отсутствуют						
100 Мб	51	43	45	43	46	44
500 Мб	220	221	221	220	222	221
1 Гб	429	428	429	430	427	428
Файлы заражены						
100 Мб	61	62	61	60	61	61
500 Мб	310	312	310	309	308	310
1 Гб	657	655	657	656	657	657

Также устанавливалось время, затрачиваемое на лечение сайта в случае его полного заражения. Для этого файл был разбит на части по 100 Мб и выбрана одна из его частей.

Проверяемый объем создавался за счет добавления этой части на сервер в каталоги с порядковыми номерами от 1 до 10. Это позволило строго контролировать объем данных. В случае проверки сайта на заражение в каталоги помещался архив объемом 100 Мб с названием файла оригинала. Этим создавалось искусственное несоответствие CRC оригинального файла с проверяемым на сервере.

Стоит обратить внимание на то, что, если бы использовались малые по объему файлы, время проверки было бы меньшим, т.к. процесс опроса файлов проходил бы более динамично. Результаты исследования представлены на рис. 2 и 3.

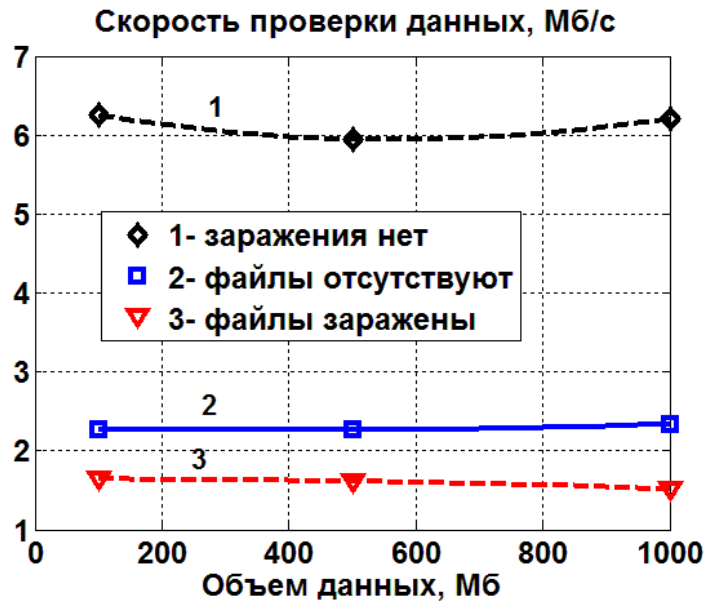


Рис. 2. Графики скорости проверки данных:
1 – заражения нет; 2 – файлы отсутствуют; 3 – файлы заражены

Результаты скорости проверки данных (рис. 2) показывают, что при отсутствии заражения файлов на сервере скорость сравнения контрольных сумм в 3...4 раза больше, чем в ситуации, когда файлы отсутствуют или были заражены. Это обусловлено тем, что по предлагаемому алгоритму файлы должны быть сохранены с сайта, а после, если не совпадают контрольные суммы, загружаются обратно на сервер.

В случае отсутствия файлов на сервере (кривая 2 на рис. 3), скорость проверки данных равна скорости их прямой загрузки на сервер, т.е. реальной скорости работы Интернет-подключения. Данная связь проиллюстрирована на рис. 3.

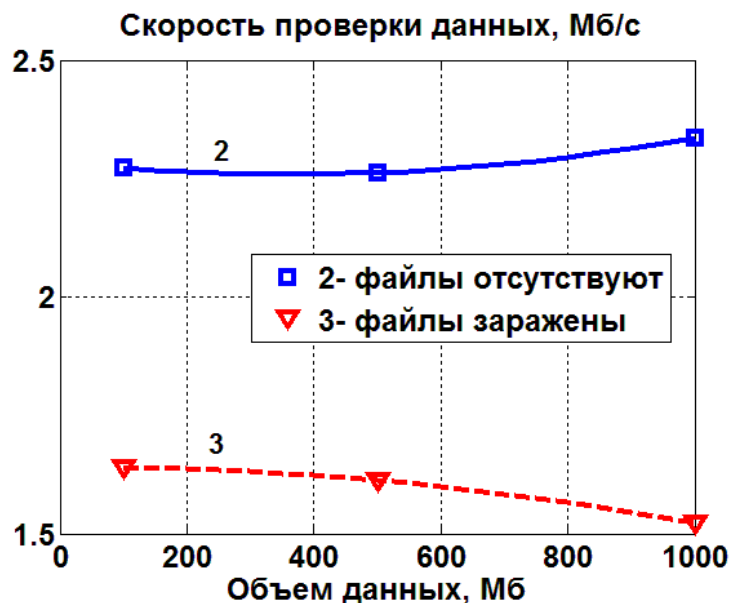


Рис. 3. График скорости проверки данных при:
2 – отсутствии файлов; 3 – заражении файлов

Минусом предложенной системы проверки сайтов является снижение скорости проверки при заражении файлов (кривая 3 на рис. 4), т.к. фактически это приводит к двукратному увеличению времени проверки.

Однако такой подход необходим, во-первых, из-за отсутствия явного метода опроса свойств файлов через FTP-соединение средствами языков программирования, во-вторых, из-за разницы файловых систем сервера и РС.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы по работе:

1. В случае организации длительного хранения оцифрованных данных на WEB-сервере или локальной сети необходимо использовать только бинарный способ записи файлов.
2. В большинстве случаев WEB-антивирусы не в состоянии справиться с реальной угрозой для сайтов.
3. Метод борьбы с вирусными угрозами для Интернет-ресурсов, основанный на проверке контрольных сумм, показывает хорошие результаты и может применяться для этих задач.
4. В современных условиях необходимо более активно использовать решения по резервному копированию данных, использовать облачные технологии и другие способы.
5. При разработке сайтов архивных, музейных, образовательных учреждений необходимо стараться группировать файлы сценариев по важности, т.к. это повлияет на быстроту проверки ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jouini M., Rabai L. B. A., Aissa B. A. Classification of security threats in information systems // *Procedia Computer Science*. 2014. 32. P. 489–496.
2. Khana J., Abbasa H., Al-Muhtadia J. Survey on Mobile User's Data Privacy Threats and Defense Mechanisms // *Procedia Computer Science*. 2015. 56. P. 376–383.
3. Jouini M., Rabai L. B. A., Khedri R. A Multidimensional Approach Towards a Quantitative Assessment of Security Threats // *Procedia Computer Science*. 2015. 52. P. 507–514.
4. Jian T., Dongxia W., Liang M., Xiang L. A scalable architecture for classifying network security threats. // *Science and Technology on Information System Security Laboratory*, 2012.
5. Яковлев Б. С., Архангельская Н. Н., Проскураков Н. Е. Исследование стойкости несетевых электронных изданий и основных видов контента // *Информационное общество: образование, наука, культура и технологии будущего: тр. XVIII объединенной конф. «Интернет и современное общество» (IMS-2015) / Университет ИТМО; Библиотека Российской академии наук. СПб., 2015. С. 153–166. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24269693>.*

ДИНАМИКА ТЕПЛОВЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.18.01

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДА АЗОТА
В ТОПКАХ НЕКРУГЛОГО ПРОФИЛЯП. А. Батраков¹, А. Н. Мракин², А. А. Селиванов²¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия²Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,
г. Саратов, Россия

Аннотация – В работе рассмотрены результаты численного расчета процессов теплопереноса при течении реагирующих газов в топке некруглого профиля газотрубных котлов. Расчеты осуществлены с применением ANSYS CFX. Численно решены уравнения неразрывности для всей смеси, неразрывности для каждого компонента, моментов, энергии и диссипации, определены энтальпии, вязкости, а также уравнения состояния. Представлены графические результаты исследования с использованием переменных, характеризующих экологические характеристики работы топки и котла в целом. Приведены значения температур и концентрации оксидов азота на выходе при различных геометрических размерах топки.

Ключевые слова: горение, оксиды азота, термический, быстрый, топливный, топка, газотрубный котёл.

I. ВВЕДЕНИЕ

В процессе общественного производства человек влияет на окружающую его среду и это является одной из наиболее актуальных современных проблем. Процесс сжигания органического топлива связан с загрязнением воздуха, поэтому эффективность работы котла в настоящее время в значительной мере определяется экологическими требованиями [1, 2, 3]. Основными токсичными компонентами, образующимися в процессе горения топлива, являются оксиды азота NO_x [1, 3]. Наибольшую опасность при сжигании природного топлива представляют оксиды азота, которые примерно в 10 раз более опасны, чем угарный газ [2, 3].

В процессе горения органического топлива в топках газотрубных котлов азот, содержащийся в воздухе и топливе, активно взаимодействует с кислородом, образуя оксид азота NO , оксид диоксида азота N_2O , а также диоксид азота NO_2 . Основная доля NO_x , образующихся в процессе горения в топках газотрубных котлов продуктов сгорания (95 – 99 %), приходится на монооксид азота NO . Другие оксиды азота образуются в меньших количествах.

Профилированные топки мало изучены. Данные по результатам теоретических исследований при изменении формы профиля топки; прямоугольного, квадратного, круглого, горизонтально расположенного эллипса, вертикально расположенного эллипса показали, что минимальную концентрацию NO на выходе из топки имеет газотрубный котел с топкой с формой профиля в виде вертикального эллипса. По отношению к кругу концентрация NO на выходе ниже и может достигать 23 % [4].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

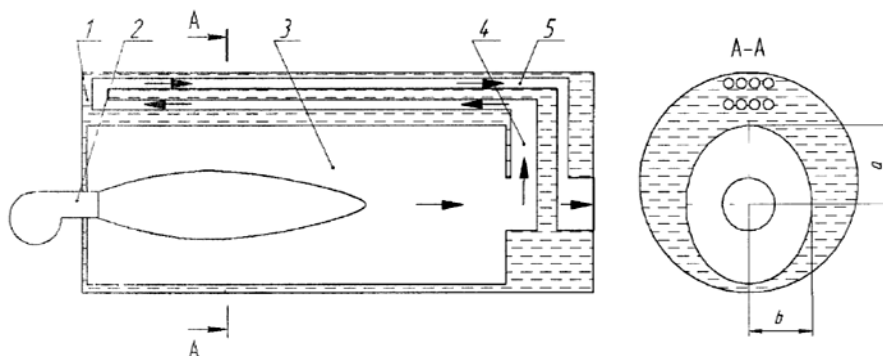


Рис. 1. Схема объекта:

1 – водяная рубашка; 2 – горелка; 3 – топка; 4 – поворотная камера;
5 – конвективный пучок труб; a – большая полуось; b – малая полуось

Объектом исследования образования оксидов азота является газотрубный котел с топкой формой поперечного сечения вертикального эллипса при различных отношениях большей полуоси a , у малой полуоси b (рис. 1). Базовой моделью, с характеристиками которой будет происходить сравнения, является топка с формой поперечного сечения круга.

В качестве величин, характеризующих экологическую эффективность топки, было выбрано отношение массовых концентраций оксидов азота на выходе из топки $\text{mass fraction NO}_{\text{ellipse}} / \text{mass fraction NO}_{\text{circle}}$ [1] для топок с поперечным сечением в форме вертикального эллипса и круга соответственно.

III. ТЕОРИЯ

Необходимым этапом моделирования высокотемпературных процессов в агрегатах энергоустановок является построение кинетических схем химического взаимодействия. В общем случае кинетическая схема представляет собой набор элементарных химических реакций, описывающих процесс преобразования компонентов рабочего тела.

Горение газообразного топлива описывается следующей реакцией: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$.

В данных реакциях одно вещество соединяется с другим в строго определенных количествах. Эти количества регламентируются стехиометрическим соотношением для необратимой и обратимой реакций, протекающих в один этап [5],

$$\sum_{I=A,B,C}^{N_C} V'_{KI} I \Leftrightarrow \sum_{I=A,B,C}^{N_C} V''_{KI} I, \quad (1)$$

где N_C – количество компонентов, участвующих в реакции; V_{KI} – стехиометрические коэффициенты для I -компонента в элементарной реакции K .

Скорость S_I образования I -компонента рассчитывается следующим образом:

$$S_I = W_I \sum_{K=1}^K (V''_{KI} - V'_{KI}) R_K, \quad (2)$$

где W_I – молярный вес I -компонента;

$$R_K = (F_K \prod_{I=A,B,C}^{N_C} [I]^{r'_{KI}} - B_K \prod_{I=A,B,C}^{N_C} [I]^{r''_{KI}}), \quad (3)$$

где R_K – скорость прямой элементарной реакции с участием I -компонента; $[I]$ – мольная концентрация I -компонента; r'_{KI} – порядок K -й реакции для I -компонента.

$$F_K = A_K T^{\beta_K} \exp\left(-\frac{E_K}{RT}\right), \quad (4)$$

$$B_K = A_K T^{\beta_K} \exp\left(-\frac{E_K}{RT}\right), \quad (5)$$

где F_K, B_K – константы скоростей соответственно прямой и обратной реакций (закон Аррениуса); A_K – предэкспоненциальный множитель; β_K – коэффициент, зависящий от температуры; $E_K = 124024$ кДж/кмоль – энергия активации; R – газовая постоянная; T – температура [72], $A_K T^{\beta_K} \approx 1,0$ для гомогенных смесей.

Далее рассмотрим основные уравнения, которые описывают реагирующую газовую смесь при следующих основных допущениях [1, 4, 5]:

- теплота от факела к стенке переносится излучением и конвективным теплообменом;
- внутри пограничного слоя давление не изменяется вдоль нормали к контуру тела и равно соответствующему давлению на внешней границе пограничного слоя;
- суммарный перенос теплоты на границе раздела газовая смесь – стенка осуществляется за счет конвективного теплообмена и излучения;
- реагирующий газ CH_4 – 100 %, окислитель – воздух.

Расчетная область представлена на рис. 2

1. Неразрывности для всей смеси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (6)$$

где ρ – плотность газовой смеси; t – время; \mathbf{U} – вектор скорость.

2. Неразрывности для каждого компонента:

$$\frac{\partial (\rho Y_I)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j Y_I)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{I\text{eff}} \frac{\partial Y_I}{\partial x_j} \right) + S_I, \quad (7)$$

где S_I – скорость образования I -компонента; $Y_I = \rho_I/\rho$ – концентрация вещества I -компонента; $\Gamma_{i\text{eff}} = \Gamma_i + \mu_t/S_{ct}$ – коэффициент диффузии; ρ_I – плотность каждого I -компонента; Γ_I – коэффициент диффузии для I -компонента; $S_{ct} = \nu/\Gamma_I$ – число Шмидта; ν – кинематическая вязкость; μ_t – турбулентная составляющая динамической вязкости.

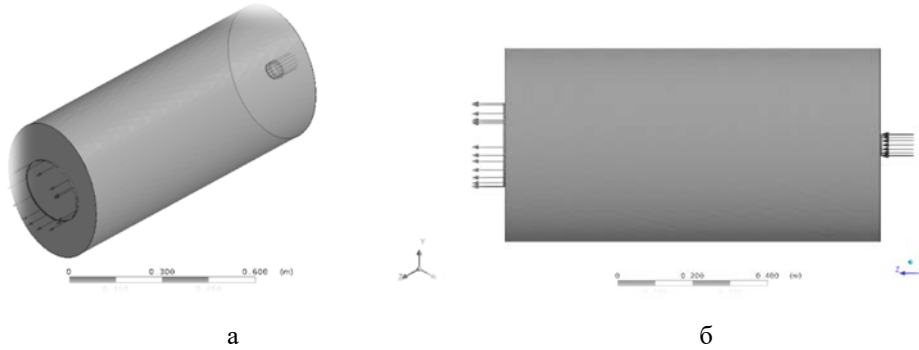


Рис. 2. Расчетные модели топки: а – в объеме, б – вид сбоку

3. Моментов:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U) = -\nabla P' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U)^T + B, \quad (8)$$

где B – сумма всех сил, действующих на объем газа; P' – давление; μ_{eff} – эффективная турбулентная вязкость.

4. Энергии и диссипации:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon - S^R, \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon). \quad (10)$$

$$\nabla k = \frac{\partial k_x}{\partial x} + \frac{\partial k_y}{\partial y} + \frac{\partial k_z}{\partial z}, \quad \nabla \varepsilon = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial z},$$

где $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε – справочные константы [73]; S^R – источниковый член; P_k – параметр турбулентности, характеризует соотношение между силами вязкости и силами выталкивающими P_{kb} [73]:

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb}. \quad (11)$$

5. Определение энтальпии:

Общая удельная энтальпия h_{tot} определяется следующим выражением:

$$h_{\text{tot}} = h + k,$$

где h – удельная энтальпия неподвижной газовой смеси.

6. Определение вязкости:

k - ε модель основывается на концепции турбулентной вязкости, поэтому

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \quad (12)$$

где μ – динамическая вязкость.

7. Уравнение состояния:

Уравнение состояния, предложенное Редлихом – Квонгом, выглядит следующим образом [5]:

$$P = \frac{RT}{v - b + c} - \frac{a(T)}{v(v + b)}, \quad (13)$$

где v – удельный объем. Величины a , b , c – константы, зависящие от конкретного вещества [5].

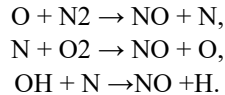
8. Начальные условия:

Принимаются значения всех параметров, входящих в систему уравнений, при времени $t = 0$ и при начальной температуре $T = 300$ К.

9. Задаются соответствующие граничные условия.

Определение образования монооксида (оксида) азота при сжигании органических топлив происходит как за счет окисления азота воздуха N_2 , так и за счет окисления азота, содержащегося в топливе. В настоящее время известны три механизма, по которым происходит образование оксидов азота: термический, быстрый и топливный. При образовании термических и быстрых NO источником азота является воздух, а в случае образования топливных NO – азотсодержащие составляющие топлива [5], но при принятых нами основных допущениях реагирующий газ CH_4 – 100 %, образование последних оксидов азота не рассматривалось.

Механизм образования термических оксидов азота был предложен Я. Б. Зельдовичем и включает следующие реакции [1]:



Реакции образования термических NO характеризуются высокой энергией активации, поэтому образование оксидов азота происходит в области высоких температур, превышающих 1800 К. Концентрация термических NO интенсивно возрастает от начала зоны горения и достигает наибольших значений непосредственно за зоной максимальных температур. Далее по длине факела концентрация оксидов азота практически не изменяется. Выражения для констант скоростей k каждой из трех реакций представлены в работе [1, 5] и выглядят следующим образом:

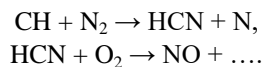
$$\begin{aligned} k_1 &= (1,8 \cdot 10^{11}) \exp\left(-\frac{38370}{T}\right), \\ k_2 &= (6,4 \cdot 10^9) \exp\left(-\frac{3162}{T}\right), \\ k_3 &= 3,0 \cdot 10^{13}. \end{aligned}$$

Образование термических NO определяют следующие основные факторы: температура в зоне горения, коэффициент избытка воздуха и время пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур. Скорость образования термического NO – компонента $S_{NO, thermal}$ – определяется выражением

$$S_{NO, thermal} = W_{NO} k_{thermal} [O][N_2], \quad (14)$$

где $k_{thermal} = 2k_1$; W_{NO} – молярная масса термического NO; $[O]$, $[N_2]$ – мольные концентрации кислорода и азота.

Исследования по сжиганию углеводородных топлив, проведенные Фенимором [1], показали, что во фронте пламени за весьма короткий промежуток времени происходит образование оксидов азота по механизму, отличному от предложенного Я. Б. Зельдовичем. Обнаруженный оксид азота был назван быстрым из-за достаточно большой скорости его образования в корневой части факела. При этом вблизи зоны горения наблюдались значительные количества цианида водорода HCN, что объясняется реагированием молекулярного азота с углеводородными радикалами:



Реакции образования быстрых оксидов NO протекают достаточно энергично при температурах 1200 – 1600 К, когда образование термических оксидов азота практически не происходит.

Скорость образования быстрого NO – компонента $S_{NO, prompt}$ – определяется выражением согласно [5]:

$$S_{NO, prompt} = W_{NO} k_{prompt} [O_2]^{1/2} [N_2] [Fuel] (W/\rho)^{3/2}, \quad (15)$$

$$k_{prompt} = A_{prompt} \exp(-T_A / T), \quad (16)$$

где A_{prompt} – число Аррениуса.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее представлены результаты решения уравнений представленной выше математической модели [1], реализованных в ANSYS CFX [5].

Расчетная область представляет собой горизонтально расположенный цилиндр, в топке установлена газовая горелка с предварительной подготовкой топливовоздушной смеси, площадь стен топочного пространства остается постоянной. Изменяемыми величинами при численном исследовании являлись: скорости топливовоздушной смеси на входе в топку и формы профиля топки, изменялись отношения большей полуоси a к малой полуоси b . Базовой моделью, с характеристиками которой будут происходить сравнения, является топка с формой

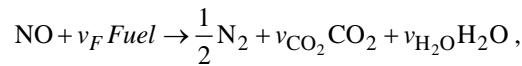
поперечного сечения круг. В качестве величин, характеризующих экологическую эффективность топки, является, прежде всего, концентрация NO_x на выходе из топки.

В качестве величин, характеризующих эффективность топки, были выбраны отношения чисел Рейнольдса $Re_{\text{ellipse}}/Re_{\text{circle}}$ и отношения массовых концентраций оксидов азота на выходе из топки $\text{mass fraction NO}_{\text{ellipse}}/\text{mass fraction NO}_{\text{circle}}$ [1, 5] для топок с поперечным сечением в форме вертикального эллипса и круга соответственно.

На рис. 3 приведены графики зависимостей $\Theta = f(x/L)$, где $\Theta = (T_i - T_{\min})/(T_{\max} - T_{\min})$ (T_i – средняя текущая температура, T_{\min} – минимальная температура, T_{\max} – максимальная температура), x – текущая координата и, $\tilde{V} = f(x/L)$, где $\tilde{V} = V_i/V_{\text{ex}}$ (V_i – текущая скорость, V_{ex} – скорость на входе в топку). Области максимальных температур и скоростей совпадают и находятся в области формирования факела.

На рис. 4 изображена зависимость $Re_{\text{ellipse}}/Re_{\text{circle}} = f(a/b)$, где Re_{ellipse} – критерий Рейнольдса в топке с поперечным сечением в форме вертикального эллипса, Re_{circle} – критерий Рейнольдса в топке с поперечным сечением в форме круга. С увеличением отношения a к b до $\approx 1,3$ наблюдается рост $Re_{\text{ellipse}}/Re_{\text{circle}}$ вследствие деформации поля скоростей. Дальнейший рост a/b приводит к уменьшению $Re_{\text{ellipse}}/Re_{\text{circle}}$ из-за роста влияния пристеночных эффектов.

Одновременно с изменением формы профиля и увеличением числа Re уменьшается массовая концентрация оксидов азота (mass fraction NO) (рис. 4) на выходе из топки котла, что достигается за счет увеличения скорости газового потока Re , уменьшения средней температуры T_{average} газовой смеси в топке и благодаря процессам рециркуляции в соответствии с уравнением



где ν – стехиометрический коэффициент; Fuel – вид топлива [5].

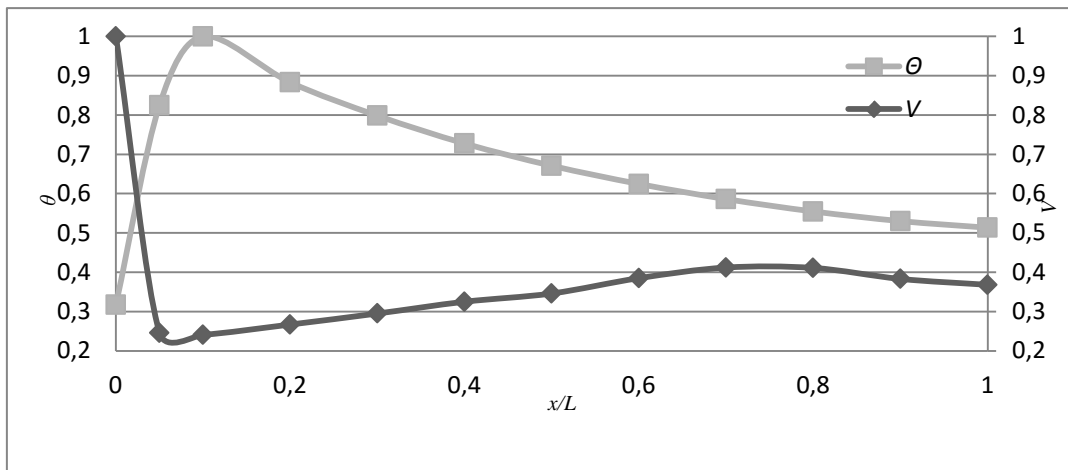


Рис. 3. График распределения температур и скоростей в топке газотрубного котла по длине топки

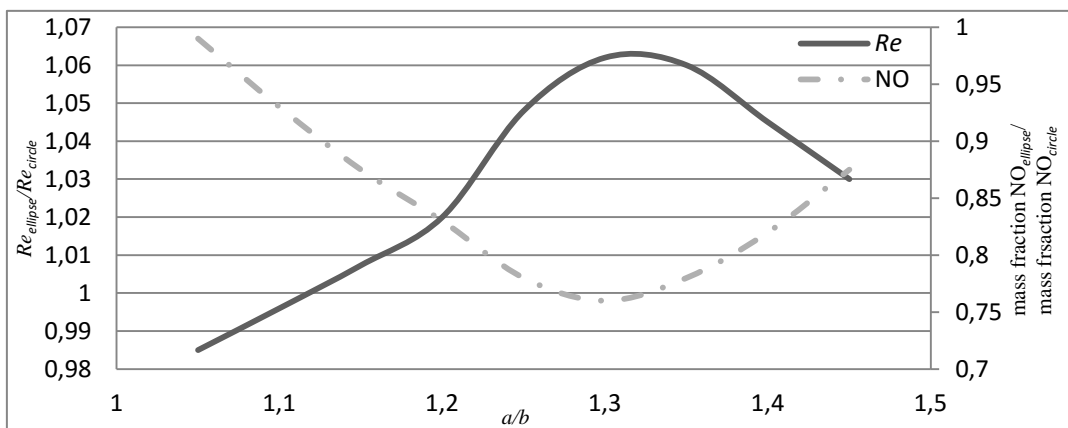


Рис. 4. Зависимость $Re_{\text{ellipse}}/Re_{\text{circle}}$ и $\text{NO}_{\text{ellipse}}/\text{NO}_{\text{circle}}$ от отношения a/b

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изменение формы профиля топочной камеры газотрубного котла с круглой на вертикально расположенный эллипс при a/b в пределах 1,25 – 1,45 ведет:

- 1) к интенсификации конвективной составляющей теплового потока – росту числа Рейнольдса $92 \cdot 10^3$ до $93,5 \cdot 10^3$;
- 2) увеличению η в пределах 3,3 %;
- 3) уменьшению массовой доли NO в пределах 23 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mikhailov A. G., Batrakov P. A., Terebilov S. V. Problems of heat transfer in the furnace of boilers. Overview of calculation methods Research Bulletin SWorld. 2013. T. J21310, no. 5. URL: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/e-journal/sworld-journal/2227-6920/j213/20948-j21310>
2. Hayhurst A. N., Lawrence A. D. Emissions of nitrous oxide from combustion // Progress in Energy and Combustion Science. 1992. Vol. 18, no. 6. P. 529–552.
3. Srivastava R. K., Hall R. E., Khan S. Nitrogen Oxides Emission Control Options for Coal-Fired Electric Utility Boilers // Journal of the Air & Waste Management Association. 2005. Vol. 55. P. 1367–1388.
4. Батраков П. А., Численное исследование образования оксида азота при сжигании природного газа в топках различного профиля газотрубных котлов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2015. № 3 (143). С. 111–114.
5. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX Release 11.0 / ANSYS, Inc. / Southpointe 275 Technology Drive. Canonsburg : PA 15317, 2006. 312 p.

УДК 621.928.99

ОСОБЕННОСТИ ПОДБОРА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА В ЗОЛОУЛОВИТЕЛЕ

В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Актуальность задачи определяется необходимостью создания методики расчета золоулавливающих аппаратов инерционно-вакуумного типа, в которой используется численный метод контрольных объемов для решения задачи улавливания золы. При этом адекватность математической модели тесно связана с корректной постановкой граничных условий определяющих качественные и количественные характеристики запыленного потока.

Целью исследования является нахождение оптимальных граничных условий для проведения численного моделирования в программном модуле ANSYS CFX. Объект исследования – запыленный поток и его характеристики в золоуловителе при изменении граничных условий. Методы, которыми пользовались при проведении каждого расчета – это сравнение полученных результатов с паспортными данными конкретных аппаратов и численный эксперимент. Результатом проведенных экспериментов являются получение корректной сетки и граничные условия, которые максимально соответствуют паспортным данным золоуловителя, таким как расход, эффективность, скорость и перепад давления. Благодаря найденным граничным условиям можно рассчитывать новые золоулавливающие установки посредством численного моделирования без проведения дорогостоящих и металлоемких натурных экспериментов.

Ключевые слова – золоулавливание, запыленный поток, золоуловитель, дисперсный состав золы.

I. ВВЕДЕНИЕ

При модернизации устаревшего оборудования проектировщики сталкиваются с проблемой визуализации процессов, происходящих в установке. Решить эту проблему можно двумя способами: либо рассчитать движение потока полуэмпирическими уравнениями (что не даст полной информации о процессе), либо с помощью

дифференциальных уравнений (которые решаются методами контрольных объемов или конечных разностей в уже готовых программных оболочках). Все вышеперечисленные методы невозможно реализовать без сетки. Сетка разбивает всё внутреннее пространство установки на мельчайшие элементы, благодаря которым вычисляется как пограничный слой, так и канальное течение. Корректность сетки, как и корректность постановки граничных условий, играют немаловажную роль в расчете движения потока.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо выбрать сетку, соответствующую максимально возможной точности получаемых результатов. При этом, выделив ряд граничных условий [1 – 4] (табл. 1), можно выбрать пару граничных условий, которая бы максимально соответствовала паспортным данным золоуловителя по расходу, степени очистки, скоростям, развивающимся в установке и перепаду давления – и получить корректный результат.

ТАБЛИЦА 1
ПЕРЕЧЕНЬ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Вход	Выход
Массовый расход потока уходящих газов	Давление
Давление	Давление
Массовый расход потока уходящих газов	Скорость потока газов
Давление	Скорость потока газов
Скорость потока газов	Давление

Выбор любой из этих пар граничных условий несет свои преимущества и недостатки касательно дальнейшего их использования при расчете нового золоуловителя. В результате экспериментов, проведенных с помощью вычислительного модуля ANSYS CFX, наглядно понятно, какие граничные условия можно наиболее корректно использовать для расчета принципиально нового золоуловителя. Далее, используя метод верификации, рассчитывается циклон ЦН-11-500 для установки соответствия полученных результатов паспортным данным. Золоулавливающая установка получена в программном модуле Solidworks.

III. ТЕОРИЯ

Используя при расчете метод контрольных объемов, качество выбранной сетки определяется исходя из правильности подбора трех показателей: orthogonality angle, mesh aspect ratio и mesh expansion factor.

Orthogonality angle – угол ортогональности, измеряет расположение вектора нормали к грани в точке интегрирования (n) к вектору от узла к узлу (s), его числовое представление желательно высчитывать по формуле $\text{Orthogonality angle} = 90^\circ - \arccos(n \cdot s)$. Mesh aspect ratio – коэффициент пропорциональности, который показывает насколько вытянут контрольный объем, желательный его показатель должен быть < 100 . Mesh expansion factor – обозначает, насколько положение узла недостаточно точно соответствует центральной точке контрольного объема; желателен < 20 .

Численный анализ проводился в оболочке ANSYS CFX [5]. При проведении расчетов была выбрана k - модель турбулентности [6, 7].

При описании процесса течения использовались классические уравнения гидрогазодинамики: уравнение неразрывности, уравнения движения [2], уравнение k- модели, уравнение для эффективной и суммарной вязкости [9].

В численном эксперименте использовалось уравнение, которым описывается движение частиц. Влияние частиц на поток будет минимальным из условия, что поток является слабозапыленным [10]. В создании уравнения движения частицы использовались разработки А.Б. Бассета [11], Ж.В. Буссинеска [12] и К.В. Озеена [13].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результатом проведенных экспериментов являются получение корректной сетки и граничные условия, которые максимально соответствуют паспортным данным золоуловителя, таким как расход, эффективность, скорость и перепад давления. Результаты проведенных экспериментов сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2
ЗАДАННЫЕ И ВЫЧИСЛЕННЫЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Граничные условия	Расчетное давление (вход–выход), [Па]	Расчетный расход (вход–выход), [кг/с]	Максимальная скорость, развитая потоком в установке, [м/с]	Эффективность, [%]
Расход 0.53 кг/с на входе – давление 100000 Па на выходе	100335...100005	0.53...0.528	20	100
Давление 100000 Па на входе, 98800 Па на выходе	61363...98934.9	12.58...8.93	1490	99
Расход на входе 0.53 кг/с – на выходе скорость 3.5 м/с	375.156...16.24	0.53...0.22	40	100
Давление на входе 100000 Па – на выходе скорость 3.5 м/с	100000...99880	0.2149...0.2143	18	100
Скорость на входе 3.5 м/с – на выходе давление 100000 Па	100011...100000	0.0664...0.06628	4,9	90

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что из всех проведенных численных экспериментов только один, изображенный на рис. 5, является как физическим, так и соответствующим паспортным характеристикам циклона, выбранного в качестве опытного.

Остальные результаты не соответствуют паспортным характеристикам, в чем можно убедиться визуально при анализе характеристик течения потока и золовых частиц, представленных на соответствующих рис. 1, 2, 3, 4.

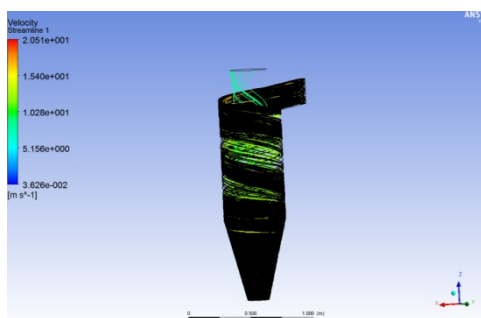


Рис. 1. Циклон с граничными условиями расход на входе, давление на выходе

На рис. 1 наблюдается степень очистки порядка 100%, чего не может быть. Динамика процессов отображена физично, но отсутствие улетающих частиц заставляет задуматься об обратном.

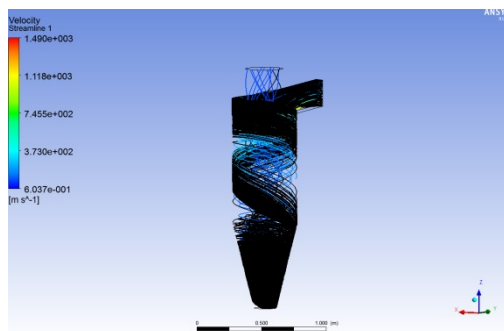


Рис. 2. Циклон с граничными условиями давление на входе, давление на выходе

На рис. 2 наблюдаются anomalно высокие скорости во входном патрубке, которых там просто не может быть. Из 100 запущенных частиц всего одна вылетела из выходного патрубка.

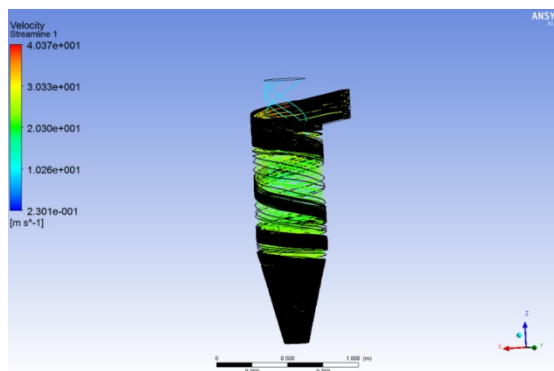


Рис. 3. Циклон с граничными условиями расход на входе, скорость на выходе

На рис. 3 скорости выше положенных в 2 раза, 100% улавливаемость частиц и несоответствия с данными по расходу заставляют лишний раз задуматься о корректности результатов.

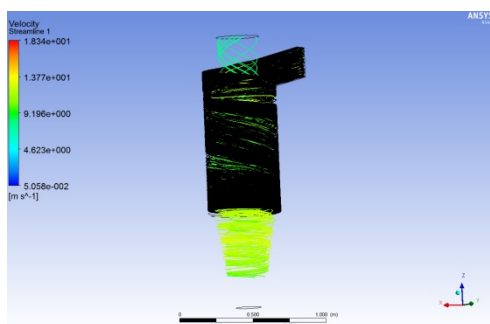


Рис. 4. Циклон с граничными условиями давление на входе, скорость на выходе

На рис. 4 частицы за отведенное им время даже не дошли до нижней части бункера, несмотря на непрерывно поступающий поток и скорость в 18 м/с. Улавливаемость золы составляет 100%, что также заставляет усомниться в полученных результатах.

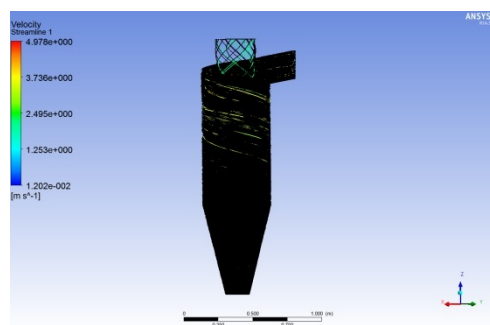


Рис. 5. Циклон с граничными условиями скорость на входе, давление на выходе (не outlet, а opening) [1]

На рис. 5 максимально хорошее отображение поведения частиц в золоуловителе; данные, которые были получены по нему, хорошо коррелируются с паспортными.

Анализируя полученные результаты экспериментальных данных, можно отметить в ряде случаев, что численное моделирование, граничные условия и выбранная сетка достаточно хорошо коррелируются с физическими условиями течения запыленного потока.

Можно выделить случаи постановки граничных условий и соответствующую сетку, для которых целесообразно использовать полученные результаты численного эксперимента в дальнейших исследованиях.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из всех численных экспериментов наиболее точно соответствует паспортным данным [11] расчет с граничными условиями скорость на входе – давление на выходе (при этом выход должен обозначаться не как outlet, а как opening). Несоответствие паспортным данным идет при расчете перепада давления, который равен всего 11 Па, а на самом деле должен достигать порядка 700 Па и выше. Данный недостаток можно пояснить не самой идеальной по всем параметрам сеткой.

Основными критериями качества сетки являются такие параметры, как orthogonality angle (отвечает за векторы нормали к грани в точке интегрирования и за вектор от узла к узлу), expansion factor, aspect ratio (максимальное значение отношения площадей граней ячейки). Таким образом, постановка граничных условий при решении течений запыленных потоков и выбор сетки должны быть выполнены тщательным образом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Д. Е. [и др.] Исследование движения и сепарации двухфазного потока в инерционно-центробежном пылеуловителе-классификаторе // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2010. Вып. 2. С. 334–339.
2. Vatin N., Strelets K., Kharkov N. Gas dynamics in a counterflow cyclone with conical nozzles on the exhaust pipe // Applied Mechanics and Materials. 2014. P. 17–21.
3. Mothilal T., Velukumar V., Pitchandi K. Effect of cyclone height on holdup mass and heat transfer rate in solid cyclone heat exchanger-CFD approach // APRN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. P. 1269–1276.
4. Ivanov A. V., Dumnov G. E., Muslaev A. V. Numerical modeling software package for computing aerodynamic characteristics of air cyclones // Chemical and petroleum engineering. 2013. P. 187–195.
5. Басов К. А. ANSYS для конструкторов. М.: ДМК Пресс, 2009. 248 с.
6. Lesieur M. Turbulence in Fluids // 4th revised and enlarged edition. SpringerScience&BusinessMedia, 2012. – 545 p.
7. Lei Zhang. Study on numerical simulation of internal flow fields in the new-type // Applied Mechanics and Materials. Switzerland, 2014. Vol. 507. P. 869–873.
8. Белоглазов В. П. Влияние входной скорости в инерционно-вакуумном золоуловителе на степень улавливания золы Экибастузского угля / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2014. № 3 (133). С. 183–197.
9. Mothilal T., Pitchandi K. Influence of inlet velocity of air and solid particle feed rate on holdup mass and heat transfer characteristics an cyclone heat exchanger // Journal of Mechanical Science and Technology. 2015. № 29 (10). P. 4509–4518.
10. Varaksin A. Yu. Turbulent gas flows with solid particles. Moscow. : Physics and mathematics publishers, 2003. 192 p.
11. Бассет А. Б. Трактат по гидродинамике: в 2 т.: пер. с англ. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. Т. 2. 394 с.
12. Буссинеск Ж. В. Анализ бесконечно малых Т. 1 Дифференциальное исчисление. Изд-во: Тип. Г. Лисснера и А. Гешеля, 1899. 287с.
13. Oseen C. W. The theory of liquid crystals. Trans. Faraday Soc. 1933. 29. P. 883–889.

УДК 53.087.92

КВАРЦЕВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Р. Ю. Гошля, И. В. Карагусов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В настоящей работе рассматривается возможность применения кварцевых чувствительных элементов для создания сенсоров измерения криогенных температур т.к. основными критериями развития криогенной термометрии являются: повышение чувствительности и стабильности метрологических характеристик датчиков, уменьшением конструктивных параметров и расширением эксплу-

атационных характеристик сенсоров, т.к. они являются основными элементами электронных блоков стабилизации температур.

Ключевые слова: кварц, криогенные температуры, частотный выходной сигнал, датчик температуры, криогенный кварцевый термометр.

И. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для решения задач криогенной термометрии используются термометры, действие которых основано на различных физических принципах. К ним относят: газовые термометры; термометры, основанные на изменении давления пара; термометры сопротивления и термопары; шумовые термометры; емкостные термометры; термометры на ядерном парамагнетизме; и др.

В табл. 1 по данным литературных источников [1], [2], [3] приведены основные типы и параметры датчиков, используемых для измерения криогенных температур.

ТАБЛИЦА 1
ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Тип датчика	Температурный диапазон	Погрешность	Примечание
Газовый термометр	от 0,0001 К до 800 К	0,05 мК	Точность измерений зависит от чистоты применяемого газа
Кремниевый диод	от 1,4К до 500К		
Платиновый термометр	от 14К до 873К	(0,01-1)К	
Железо-родиевый термометр	от 0,65К до 500К	1	
Золото, палладий, вольфрам, индий и сплав железа с марганцем или никелем	от 2К до 10К	-	разрешение (0,03 – 0,1)К
Терморезистор из карбида платины	От 0,08 К до 14К	погрешность измерения после калибровки по газовому термометру 0,05%	разрешение (0,01 – 0,2)К
Магнитные термометры	от 0,5К до 14К	погрешность 0,003% (15мК)	
Емкостной термометр	от 1К до 300К	погрешность 0,5К	

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обзор сенсоров, применяемых в криогенной термометрии, показал, что повышение точности и стабильности измерений возможно при помощи термометров, чувствительным элементом которых является кварцевый пьезоэлемент. Учитывая высокую разрешающую способность современной частотно-измерительной аппаратуры, можно применить кварцевые термометры для повышения чувствительности до уровня 10^{-5} К при сохранении высокой надежности и погрешности измерений до $(10^{-4} \div 10^{-6})$ К [4].

Термометры использующиеся в области низкотемпературной термометрии должны обладать следующими качествами:

- хорошая воспроизводимость параметров после воздействия низких температур;
- хорошая чувствительность;
- широкий диапазон измеряемых криогенных температур;
- низкая чувствительность к ионизирующему излучению и магнитным полям;
- малым временем установления теплового равновесия;
- минимальным тепловыделениям при низких температурах, чтобы не перегреть чувствительный элемент датчика

В литературных источниках [5], [6] приводятся сведения о применении кварцевых резонаторов при температуре 2 К для повышения стабильности генерируемой частоты.

Термометр на основе пьезоэлектрического кварца использует зависимость изменения собственной резонансной частоты пьезоэлемента от температуры. Основное преимущество кварцевых термометров состоит в том, что в качестве чувствительного элемента применяется пьезорезонатор. Пьезоэлектрический резонатор

представляет собой электромеханическую систему, в которой используется явление прямого и обратного пьезоэффекта, которая обычно выполнена в виде двухполюсника, объединяющего системы электрического возбуждения механических колебаний и съема электрического сигнала, пропорционально их амплитуде. Ввиду целого ряда свойств одним из самых распространенных пьезоэлектриков, применяемых в пьезоэлектрических резонаторах, является пьезокварц. Кварцевые резонаторы имеют высокую добротность 10^5 и более, кратковременную и долговременную стабильность 10^{-4} до 10^{-7} , практически отсутствует гистерезис при механических, температурных и электрических воздействиях.

На основе кварцевых резонаторов различных срезов возможно создание прецизионных резонаторов-датчиков температуры. Чувствительным элементом датчика температуры является кварцевый пьезоэлемент термочувствительного среза, который помещен в корпус и соединен с генератором. Такой преобразователь имеет частотный выход, а значение температуры вычисляется по формуле:

$$t = t_0 + C_1(\Delta f - f_0) + C_2(\Delta f - f_0)^2 + C_3(\Delta f - f_0)^3,$$

где: t – измеряемая температура; Δf – текущее значение частоты с преобразователя;

f_0 – частота, соответствующая опорной температуре t_0 ; C_1, C_2, C_3 – калибровочные коэффициенты.

В качестве среза чувствительного элемента был выбран срез кварца $ух1/+34^\circ/5$ с точностью угловой ориентации $\pm 30''$. Данный срез обладает практически линейной зависимостью изменения частоты в диапазоне температур от минус 80°C до плюс 140°C , в диапазоне криогенных температур не исследовался.

Конструктивно сенсор представляет собой стеклянный баллон типа «Дробь», в котором при помощи контактных пружин припаян припоём марки ПСР10-90 кварцевый чувствительный элемент.

Для улучшения теплообмена между стеклянным баллоном и кварцевым чувствительным элементом корпус герметизировался с последующим газонаполнением – гелием.

Чувствительные элементы датчиков были настроены при помощи ионно-плазменного травления на частоту $5,0 \text{ МГц} \pm 0,5 \text{ кГц}$, при комнатной температуре (23°C). Параметры датчиков были стабилизированы согласно методике, описанной в работе [7].

Для исследования зависимости кварцевые датчики были установлены в измерительную ячейку гелиевого криостата замкнутого цикла с характеристиками, приведенными в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИОСТАТА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

Тип охладителя	ГКМ Гиффорд Мак Магона
Холодопроизводительность первой ступени охладителя при 50 К, Вт	35
Холодопроизводительность второй ступени охладителя 4,2 К, Вт	1,5
Минимальная температура в криостате, К	2,5
Тип вакуумного насоса	Двухступенчатый вакуумный пост, первая ступень: мембранный насос; вторая ступень: турбомолекулярный насос.
Остаточное давление в камере криостата, мм рт.ст.	$1 \cdot 10^{-8}$

Температура в криостате изменялась в диапазоне от плюс 100°C до минус 196°C . Значение контролировалось при помощи платинового термометра сопротивления первого разряда марки ТСПН-1.

На рис. 1 приведена экспериментальная и расчетная зависимости изменения резонансной частоты опытного образца резонатора от температуры в области криогенных температур.

Проанализировав зависимость изменения резонансной частоты, можно сделать вывод о том, что возможно использовать кварцевые термочувствительные срезы для построения систем измерения криогенных температур. Такие системы измерения могут применяться в различных криогенных установках, построенных на газовых криогенных машинах, таких как ГКМ Гиффорд Мак Магона, ГКМ Стирлинга, пульсационная труба, термоакустический охладитель.

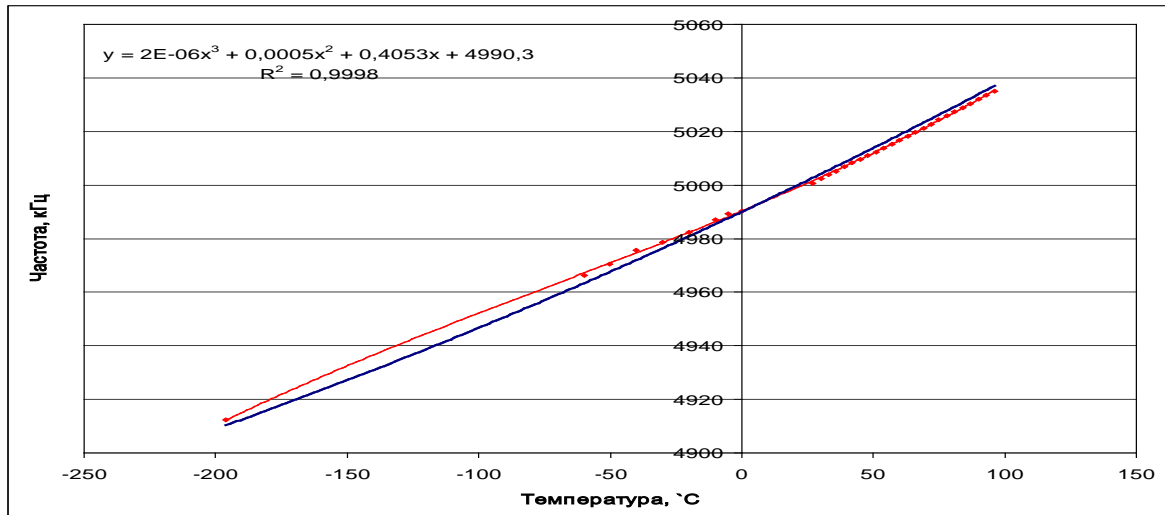


Рис. 1. Зависимость изменения резонансной частоты опытного образца кварцевого температурно-чувствительного элемента (— — экспериментальная зависимость; — — расчетная)

III. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сенсоры температуры на основе пьезоэлектрического кварца по своим характеристикам и параметрам сопоставимы с сенсорами, приведёнными в табл. 1, и обладают следующими достоинствами:

1. Простота обработки выходного сигнала.
2. Высокая временная стабильность параметров во времени, вызванная свойствами применяемого материала чувствительного элемента.
3. Независимость показаний от внешних электромагнитных и механических воздействий.
4. Высокая разрешающая способность.
5. Возможность передачи информационного сигнала на большие расстояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляков В. П. Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 1982.
2. Олейник Б. Н. Лаздина С. И. Приборы и методы температурных измерений. М.: Изд-во Стандартов. 1987.
3. Ардашев В. И. Измерения низких температур. М., 1975.
4. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
5. Смагин А. Г., Ярославский М. И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М.: Энергия, 1970. 488 с.
6. Смагин А. Г. Фундаментальное поглощение упругих волн в кристаллах. М.: Воентехиздат, 2002. 150 с.
7. Гошля Р. Ю., Алексеева Н. И. Технология повышения временной стабильности кварцевых резонаторов высокочастотного диапазона // Компоненты и технологии. 2010. № 6. С. 166–167.

УДК 621.22

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА НА РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ПОРШНЕВОЙ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ОБЪЕМНОГО ДЕЙСТВИЯ

И. Э. Лобов¹, В. Е. Щерба², В. В. Шалай², А. В. Григорьев², Е. А. Павлюченко²

¹АО «Омский завод транспортного машиностроения», г. Омск, Россия

²Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В статье представлены результаты численного эксперимента проведенного с помощью разработанной математической модели рабочих процессов новой перспективной конструкции поршневой гибридной энергетической машины объемного действия. Проведен анализ влияния скорости вращения коленчатого вала на рабочие процессы, энергетические и расходные характеристики поршневой ги-

бридной энергетической машины объемного действия. В результате проведенного анализа определено, что увеличение угловой скорости вращения коленчатого вала приводит к увеличению расхода жидкости, увеличению равномерности подачи газа и уменьшению индикаторного изотермического КПД и коэффициента подачи ПГЭМОД.

Ключевые слова: компрессор, рабочие процессы, охлаждение, гибридная машина.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на предприятиях производства нефтехимических продуктов существует потребность использования и получения сжатых газов. Основными средствами получения сжатых газов в большинстве данных случаев выступают поршневые компрессоры. Существенной экономичностью при получении сжатых газов по сравнению с компрессорами обладают гибридные энергетические машины объемного действия. Высокая экономичность их работы, прежде всего, связана с интенсивным охлаждением сжимаемого газа, низким количеством утечек газа и пониженным значением работы сил трения.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На сегодняшний день известно большое количество конструктивных исполнений поршневых гибридных энергетических машин (ПГЭМОД), имеющих определенные особенности работы [1]. Так, авторами работы [2] была предложена идея использования энергии колебаний давления газа в линии нагнетания компрессорной секции для функционирования насосной секции ПГЭМОД (рис. 1)

Описание конструкции.

Конструкция ПГЭМОД, представленная на рис. 1, отличается простотой исполнения, способностью работать на высоких частотах вращения, высоким ресурсом работы насосной секции.

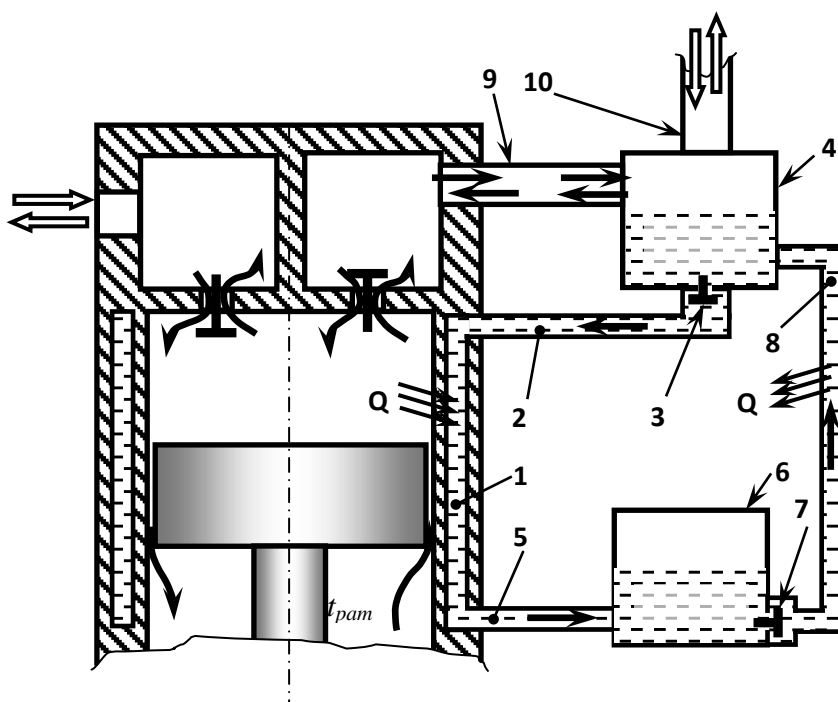


Рис. 1. Принципиальная схема поршневой гибридной энергетической машины, использующей колебания давления газа в линии нагнетания

Работа машины заключается в периодическом возникновении скачка (за счет новой порции газа в процессе его нагнетания) давления газа в ресивере 4, приводящего к проталкиванию жидкости через клапан 3, трубопроводы 2, 5 и рубашечное пространство 1 в ресивер 6. Перетекание жидкости из ресивера 6 обратно в ресивер 4 происходит за счет последующего уменьшения давления в ресивере 4, обусловленного постоянным истечением газа через трубопровод 10 при протекании процессов обратного расширения, всасывания и сжатия в компрессорной секции ПГЭМОД (подача газа в ресивер 4 отсутствует).

III. ТЕОРИЯ

Математическая модель.

На основе современных методик моделирования рабочих процессов поршневого компрессора и ПГЭМОД [3, 4] была разработана математическая модель рабочих процессов исследуемой ПГЭМОД [5]. Данная модель объединяет модели рабочих процессов компрессорной и насосной секции, а также модели движения газа в соединительном трубопроводе 9. Разработанная математическая модель базируется на фундаментальных законах сохранения массы, движения и энергии и уравнениях состояния для идеального газа и реальной жидкости.

Расчет нестационарного одномерного движения газа проводился методом «крупных частиц». Системы обыкновенных дифференциальных уравнений решались методом Эйлера.

Адекватность разработанной математической модели подтверждается использованием фундаментальных законов сохранения массы, движения и энергии, а также проведенным комплексом экспериментальных исследований [2].

Разработанная математическая модель позволяет провести анализ влияния основных конструктивных и режимных параметров на характеристики работы поршневой гибридной энергетической машины.

В качестве базового варианта для проведения анализа принимаем ПГЭМОД, имеющую следующие основные конструктивные размеры.

Компрессорная секция экспериментального образца ПГЭМОД:

Цилиндр: диаметр цилиндра – 42 мм; ход поршня – 38 мм.

Всасывающий газовый клапан: диаметр седла – 15 мм; диаметр тарелки – 17 мм; ход – 1,5 мм; жесткость пружины – 4,23 Н/мм.

Нагнетательный газовый клапан: диаметр седла – 10 мм; диаметр тарелки – 12 мм; ход – 1,5 мм; жесткость пружины – 4,7 Н/мм; кол-во – 2 шт.

Трубопровод 9 от компрессора до ресивера 4: внутренний диаметр – 8 мм; длина – 550 мм.

Насосная секция экспериментального образца ПГЭМОД:

Ресиверы: диаметр цилиндра – 60 мм; высота цилиндра – 120 мм; диаметры входа жидкости или газа – 16 мм.

Жидкостный клапан: диаметр седла – 12 мм; диаметр тарелки – 14 мм; ход – 4 мм; жесткость пружины – 4 г/мм.

Гидролинии: внутренний диаметр – 6 мм; длина трубопровода 2 – 290 мм; длина трубопровода 5 – 285 мм; длина трубопровода 8 – 335 мм.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Угловая скорость коленчатого вала является одним из двух основных режимных параметров, определяющих эффективность работы как насоса, так и компрессора. В настоящее время в поршневых компрессорах существует тенденция к повышению угловой скорости вращения коленчатого вала до 3000 об/мин, что позволяет улучшить массогабаритные показатели изделия в ущерб его ресурсу.

Рассмотрим работу ПГЭМОД в диапазоне частот от 1100 об/мин до 3000 об/мин, наиболее характерной для поршневых компрессорных машин и отношении давлений $\varepsilon = 5$.

На рис. 2 представлены индикаторные диаграммы и мгновенное давление в нагнетательной полости при значениях угловой скорости 1100 об/мин и 3000 об/мин. Из представленных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Максимальное давление газа в рабочей компрессорной полости с увеличением $n_{об}$ увеличивается и при $n_{об} = 3000 \text{ об/мин}$ его мгновенное значение превышает 0,8 МПа. Увеличиваются также относительные потери давления в процессах всасывания и нагнетания, а также относительные потери работы в них.

2. При увеличении угловой скорости вращения уменьшается частота колебаний при незначительном увеличении амплитуды колебаний.

Необходимо отметить, что при $n_{об} = 1100 \text{ об/мин}$ в начале процесса нагнетания в полости нагнетания наблюдаются колебания со значительной амплитудой и малой частотой, а затем эти колебания вырождаются в колебания с большей частотой и малой амплитудой. При $n_{об} = 3000 \text{ об/мин}$ частота колебаний давления в полости нагнетания остается постоянной на протяжении всего цикла, при этом амплитуда колебаний после процесса нагнетания уменьшается.

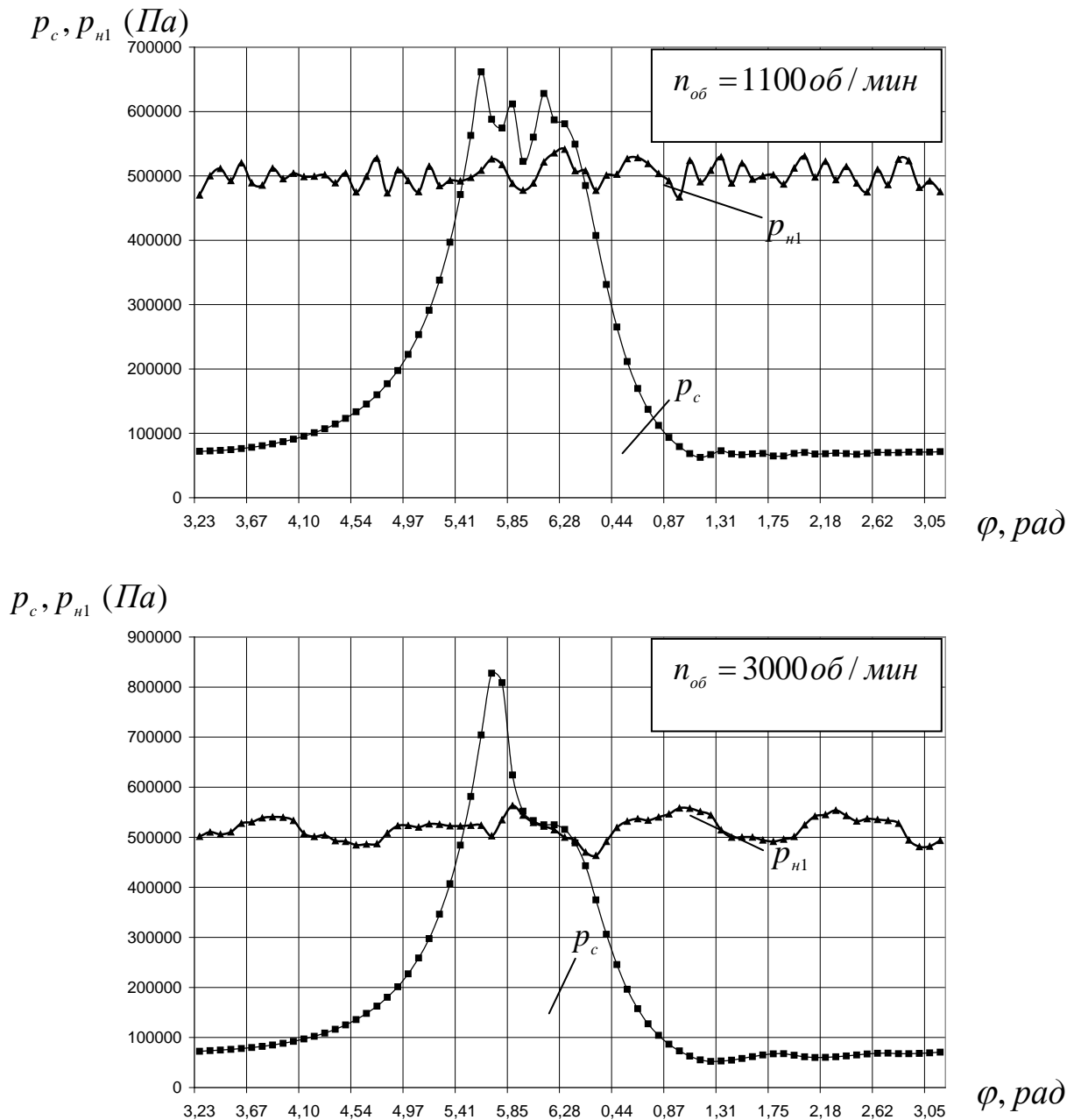


Рис. 2. Зависимости мгновенного давления газа в рабочей полости и в полости нагнетания ПГЭМОД от угла поворота коленчатого вала

На Рис. 3 (а) и (б) представлены зависимости изменения мгновенного давления в полости нагнетания и ресивере 4. Представленные результаты позволяют сделать вывод, что частота колебаний уменьшилась, колебания находятся в противофазе во всех случаях и наблюдается незначительное увеличение амплитуды колебаний с ростом $n_{об}$.

Представленные на рис. 4 (а) и 4 (б) изменения мгновенного давления в ресиверах 4 и 6 по углу поворота коленчатого вала позволяют сделать следующие выводы:

1. Амплитуды колебаний давлений в ресиверах 4 и 6 остаются примерно одинаковыми.
2. С увеличением угловой скорости наблюдается значительное уменьшение частоты колебаний давления в ресивере 4. Колебания давления в ресивере 6 практически отсутствуют при различных значениях угловой скорости коленчатого вала.

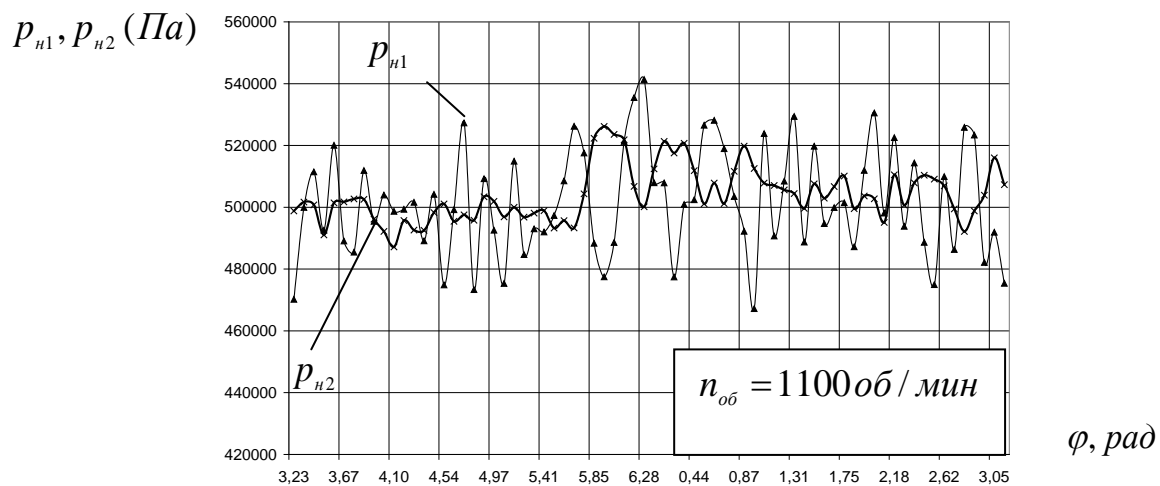


Рис. 3 (а). Зависимость мгновенного давления в нагнетательной полости и в ресивере 4 от угла поворота коленчатого вала

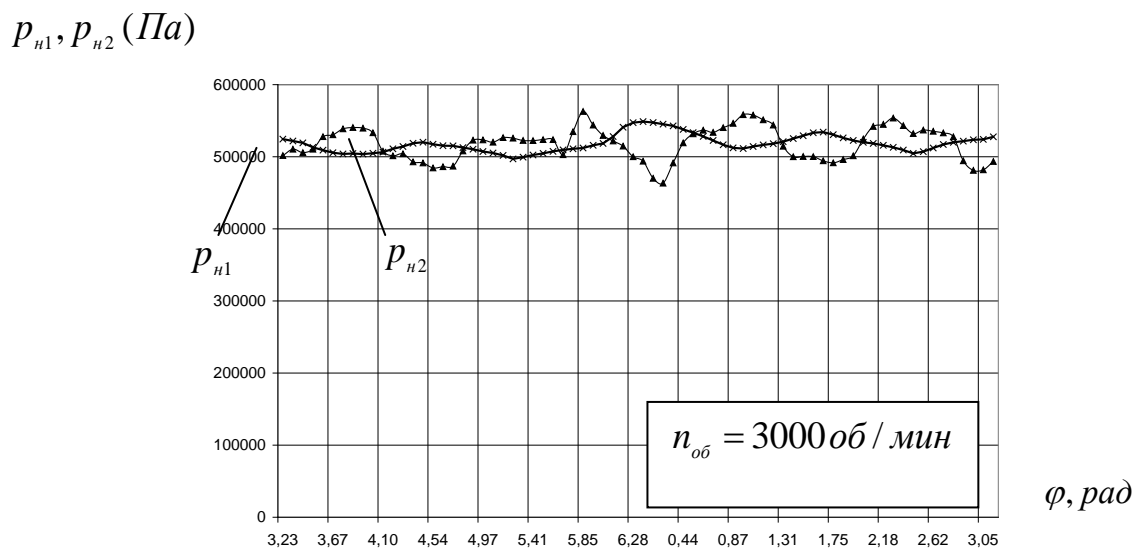


Рис. 3 (б). Зависимость мгновенного давления в нагнетательной полости и в ресивере 4 от угла поворота коленчатого вала

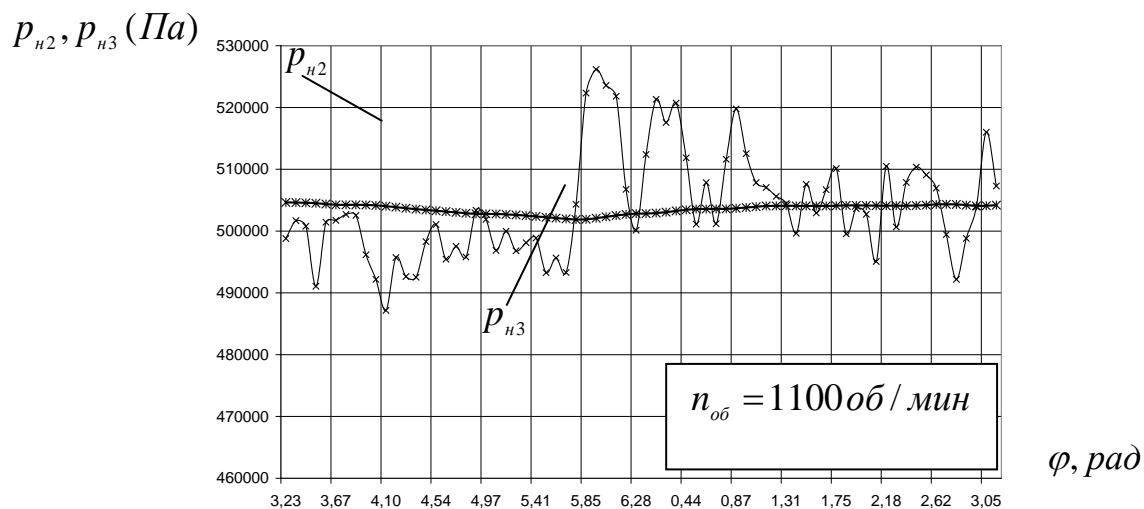


Рис. 4 (а). Зависимости мгновенного давления в ресиверах 4 и 6 от угла поворота коленчатого вала

$p_{н2}, p_{н3} \text{ (Па)}$

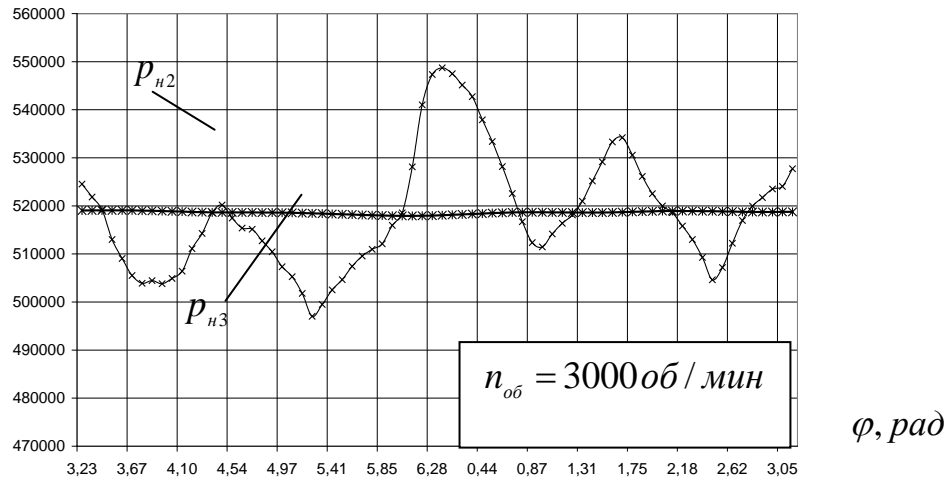


Рис. 4 (б). Зависимости мгновенного давления в ресиверах 4 и 6 от угла поворота коленчатого вала

3. На фазе нагнетания газа в компрессорной полости давление $p_{н2}$ превышает давление в ресивере 6 $p_{н3}$. Затем следует участок примерно одинакового по амплитуде превышения давления между $p_{н2}$ и $p_{н3}$ и наоборот. На участке от $\varphi = 3,23$ до $\varphi = 5,85$ давление $p_{н3}$ превышает давление $p_{н2}$. При $n_{об} = 3000 \text{ об/мин}$ этот участок чуть сдвинут по углу поворота коленчатого вала на величину $\varphi = 0,26$.

Уменьшение частоты колебаний давления $p_{н2}$ приводит к уменьшению частоты колебаний скоростей V_{2w} и V_{3w} (рис. 5 (а) и (б)). Увеличение амплитуды колебаний давления в ресивере 4 и 6 с увеличением $n_{об}$ приводит к увеличению амплитуды колебаний скоростей V_{2w} и V_{3w} . Колебания скоростей V_{2w} и V_{3w} по амплитуде происходит четко в противофазе.

В процессе нагнетания амплитуда скорости V_{2w} максимальна и затем происходит ее затухание (см. рис. 5 (б)). Мы наблюдаем три всплеска скорости V_{2w} с постепенным затуханием амплитуды. Здесь же мы видим четыре всплеска скорости V_{3w} с постепенным наращиванием амплитуды.

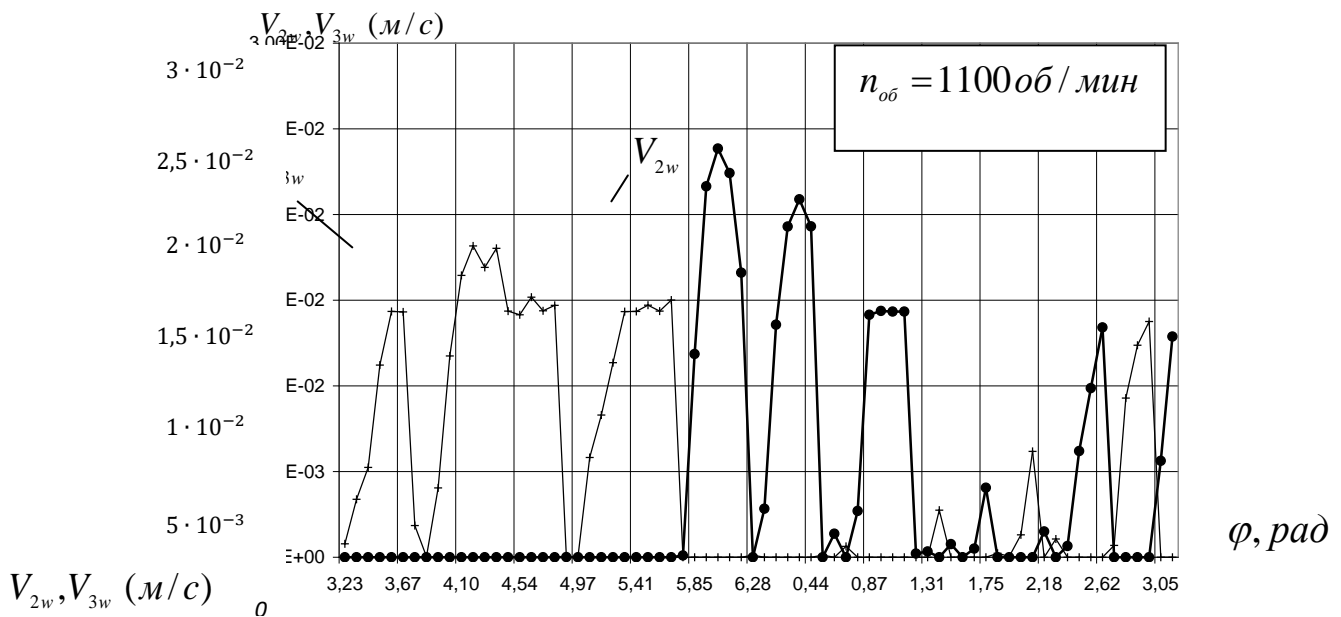


Рис. 5 (а). Зависимость мгновенных скоростей V_{2w} и V_{3w} от угла поворота коленчатого вала

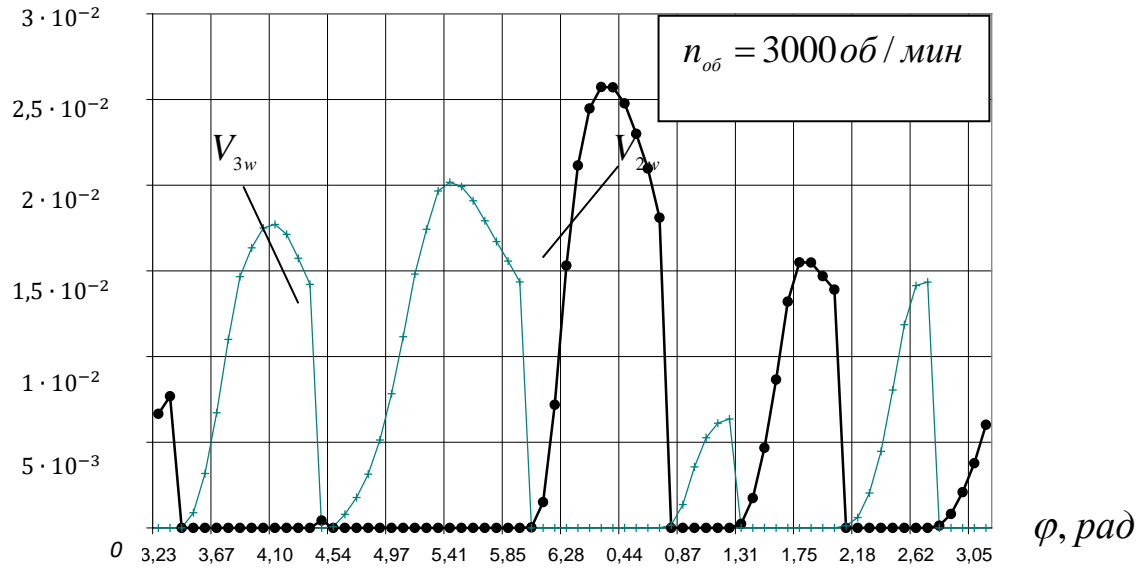


Рис. 5 (б). Зависимость мгновенных скоростей V_{2w} и V_{3w} от угла поворота коленчатого вала.

Изложенные выше аспекты приводят к увеличению средних скоростей V_{3wcp} и V_{2wcp} . С увеличением угловой скорости коленчатого вала равномерность подачи газа к потребителю увеличивается. Данное явление связано с тем, что обратное течение газа при $n_{об} = 3000 об/мин$ практически отсутствует, а при $n_{об} = 1100 об/мин$ обратное течение газа весьма значительное.

Несмотря на то что расход охлаждающей жидкости G_w с увеличением $n_{об}$ увеличивается, отношение массового расхода жидкости к расходу газа G_w/G_2 уменьшается, т.к. увеличение расхода газа происходит быстрее, чем увеличение расхода охлаждающей жидкости (см. рис. 6).

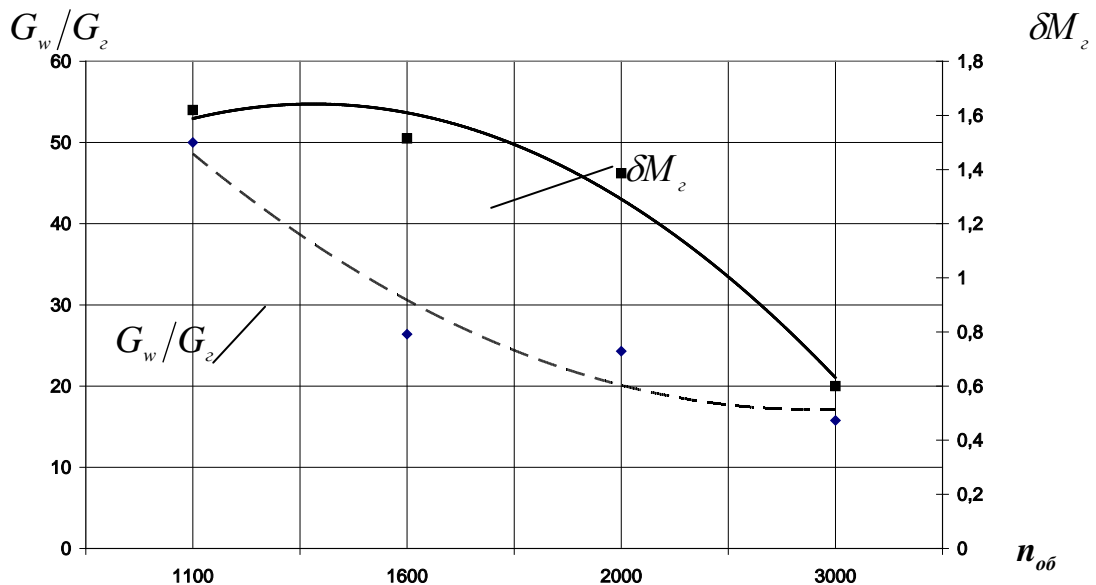


Рис. 6. Зависимости относительного расхода охлаждающей жидкости и неравномерности подачи газа к потребителю от угловой скорости коленчатого вала

Увеличение потерь работы в процессах всасывания и нагнетания, а также уменьшение количества отводимой теплоты приводит к уменьшению индикаторного изотермического КПД и коэффициента подачи ПГЭМОД (рис. 7).

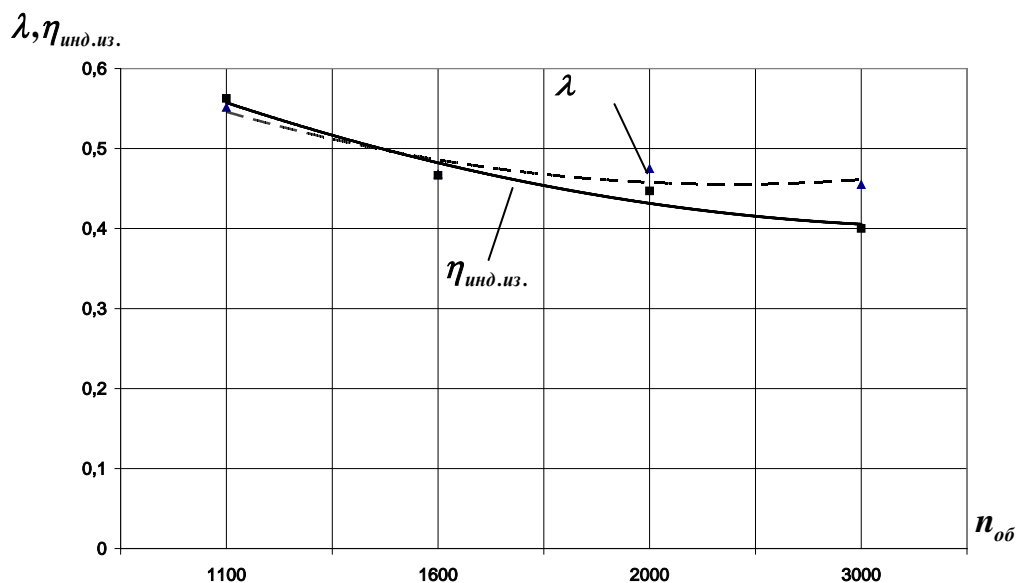


Рис. 7. Зависимость коэффициента подачи и индикаторного изотермического КПД от угловой скорости коленчатого вала.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что расход охлаждающей жидкости в насосной секции увеличивается при увеличении угловой скорости вращения коленчатого вала. Увеличение угловой скорости вращения коленчатого вала также приводит к увеличению равномерности подачи газа, уменьшению индикаторного изотермического КПД и коэффициента подачи ПГЭМОД.

Прикладные научные исследования проводятся при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57414X0068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щерба В. Е., Болштянский А. П., Шалай В. В., Ходорева А. В. Насос-компрессоры. Рабочие процессы и основы проектирования. М.: Машиностроение, 2013. 388 с.
2. Лобов И. Э. Разработка и экспериментальное исследование системы охлаждения поршневого компрессора, основанной на колебательных явлениях газа в линии нагнетания // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2015. № 3(143). С. 145–149.
3. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. Теория и расчет. М.: Колос, 2000. Т. 1. 456 с.
4. Scherba V. E., Shalai V. V., Pavljuchenko E. A. [et al.]. Work Process Calculation of Rotary Hybrid Energy Converting Displacement Machines // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 219–227.
5. Лобов И. Э., Щерба В. Е. Разработка и расчет системы жидкостного охлаждения поршневого компрессора на основе использования колебаний давления газа на нагнетании // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 4. С.19–25.

УДК 621.512

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИВОДА
В ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРАХ
С ГАЗОСТАТИЧЕСКИМ ЦЕНТРИРОВАНИЕМ ПОРШНЯ

Е. А. Лысенко, А. П. Болштынский

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – На сегодняшний день современная промышленность предъявляет более жесткие требования к чистоте сжимаемых газов. Решение этой проблемы ведется разными путями. Предлагается применить особую конструкцию поршня с щелевыми (псевдопористыми) питателями. В статье рассматриваются основные расчетные характеристики поршневого компрессора с газостатическим центрированием поршня и комбинированным механизмом привода. Показано, что имитация дросселей газостатического подвеса поршня в виде шероховатых окружных щелей позволяет снизить затраты газа на центрирование поршня и повысить экономичность компрессора.

Ключевые слова: поршневой компрессор, газостатический подвес, щелевые питатели, дроссели, пористые питатели, чистый газ, ресурс работы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение требований к чистоте сжимаемых газов, используемых в различных отраслях промышленных устройств (точное машиностроение, медицинская техника, фармацевтическая и пищевая промышленность, холодильная и криогенная техника и др.) потребовало изменений в составе компрессорных станций или конструкции компрессоров. Производство этих машин пошло тремя путями.

Первый путь предполагает использование компрессоров, в которых рабочие органы в камере сжатия не контактируют друг с другом. Основной тип таких машин – компрессоры динамического действия. Их недостаток – невозможность получения средних и малых расходов при наиболее широко используемом в промышленности диапазоне давлений (около 0,4 – 0,8 МПа).

Второй путь основан на применении в контактирующих соединениях композитных материалов, которые не требуют смазки жидкими и консистентными маслами. К их недостатку относится неизбежный износ композитов и их склонность к деструкции при температуре более 120°C.

Третий путь предполагает использование устройств для очистки сжатого газа, которые устанавливаются после компрессора.

Реально получили наибольшее распространение второй и третий пути.

В конце 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия фирмой Sulzer были предложены конструкции лабиринтных компрессоров большой производительности, в которых поршень не касается стенок цилиндра за счет создания между ними несущего газового слоя (компрессоры с газостатическим центрированием поршня, ПКГЦП). Однако возникшая конкуренция с появившимися одновременно композитными материалами для изготовления поршневых колец и опорных подшипников не дала возможности полноценно развить применение газовой смазки в поршневых компрессорах. И только острая необходимость создания малорасходных и микро-расходных поршневых машин без смазки для космической отрасли привела в практическую плоскость это направление [1 – 3 и др.].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основным недостатком ПКГЦП является значительный расход газа на центрирование поршня. Причем авторы исследования [1] показали, что чем меньше диаметр поршня (чем меньше производительность компрессора), тем отношение расхода газа на центрирование к производительности компрессора выше. Снизить необходимый расход газа на центрирование поршня можно за счет снижения боковых усилий, действующих на поршень. Авторами [4, 5] предложена конструкция малорасходного ПКГЦП, в котором боковые усилия со стороны механизма привода поршня теоретически равны нулю. В исследовании, проведенном автором [6], теоретически и экспериментально показано, что такая конструкция, с учетом неточности изготовления механизма привода движения поршня, обеспечивает кратное снижение боковых усилий.

Однако в этом случае возник вопрос о невозможности снизить расход газа путем применения обычных питающих отверстий (дросселей), т.к. их необходимый диаметр становится меньше 0,1 мм.

Эта проблема может быть решена за счет замены питающих отверстий непрерывными круговыми псевдопористыми питателями, исследование которых проделано автором [7]. Питатели образуются за счет микронеровностей прижатых друг к другу шероховатых поверхностей.

Задачей настоящего исследования является определение преимущества таких питателей по сравнению с питателями в виде обычных отверстий, минимальный диаметр которых принят равным 0,1 мм.

Методика анализа

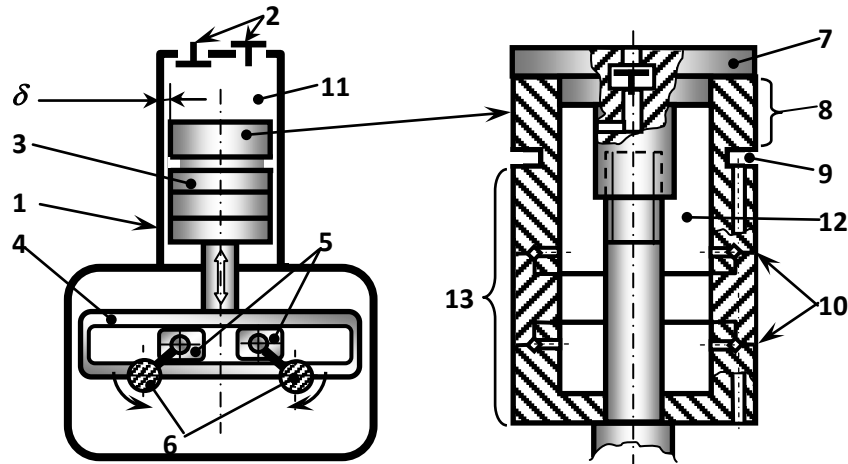


Рис. 1. Схема компрессора с комбинированным механизмом привода

На рис. 1 изображена схема компрессора с комбинированным механизмом привода. Схема ПКГЦП с комбинированным приводом и псевдопористыми питателями газостатического подвеса поршня:

1. Цилиндр. 2. Самодействующие клапаны. 3. Поршень. 4. Кулиса. 5. Ползуны.

6. Приводные валы. 7. Крышка поршня с обратным клапаном. 8. Уплотнительная часть. 9. Отделительная канавка с каналом сброса. 10. Псевдопористые питатели. 11. Рабочая полость цилиндра. 12. Полость поршня. 13. Несущая часть подвеса.

При синхронном и противоположно направленном вращении валов 6 поршень 3 совершает возвратно-поступательное движение, при котором газ всасывается в полость 11, сжимается в ней и нагнетается потребителю. Одновременно газ через обратный клапан, расположенный в поршне, попадает в его полость 12, которая является небольшим ресивером, и дросселируется через круговой зазор, который образован при контакте шероховатых поверхностей 10, в зазор δ несущей части газостатического подвеса 13.

Все силы, действующие на поршень 3 со стороны механизма привода, в такой конструкции полностью уравновешены при ее идеальном изготовлении. Поэтому боковые усилия на поршне могут возникать только в результате неточности изготовления и при воздействии на компрессор вибрационных нагрузок.

Методика расчета несущей способности и жесткости такого подвеса при его питании через дроссельные отверстия подробно изложена в монографии [1]. Там же приведена и система уравнений, описывающих состояние газа в полости 11 цилиндра и в полости 12 поршня при работе компрессора. Расчет течения газа через псевдопористые питатели 10 приведен в диссертации [7] и в статье [8].

Использование вышеуказанных методов расчета позволило создать математическую модель ПКГЦП с псевдопористыми питателями, с помощью которой возможен расчет основных характеристик компрессора и газостатического подвеса поршня.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ВЫВОДЫ

Анализ проведен для ПКГЦП с диаметром цилиндра 40 мм общей длиной поршня 60 мм при длине уплотняющей части 20 мм для давлений нагнетания 3 и 6 бар.

На рис. 2 – 4 показаны некоторые наиболее важные результаты расчетов.

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Применение псевдопористых питателей для газостатического центрирования поршня позволяет существенно снизить расход газа и совершенную над ним работу по сравнению с дросселями в виде простых отверстий.

2. Псевдопористые питатели дают возможность повысить жесткость центрирования поршня, снизить утечки газа и, таким образом, повысить экономичность ПКГЦП.

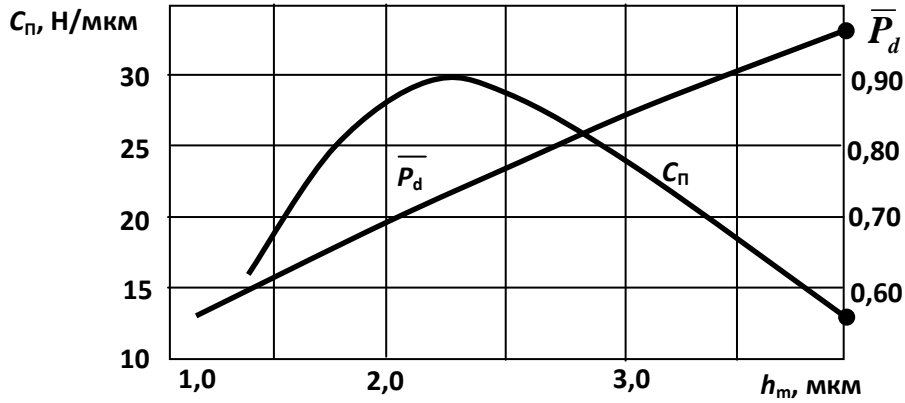


Рис. 2. Зависимость жесткости C_{II} и относительного давления наддува от средней высоты псевдопористой щели при давлении наддува $P_H = 3$ бар, $\delta = 12$ мкм. Точками обозначены параметры подвеса с дросселями в виде отверстий с диаметром 0,1 мм (6 отв.)

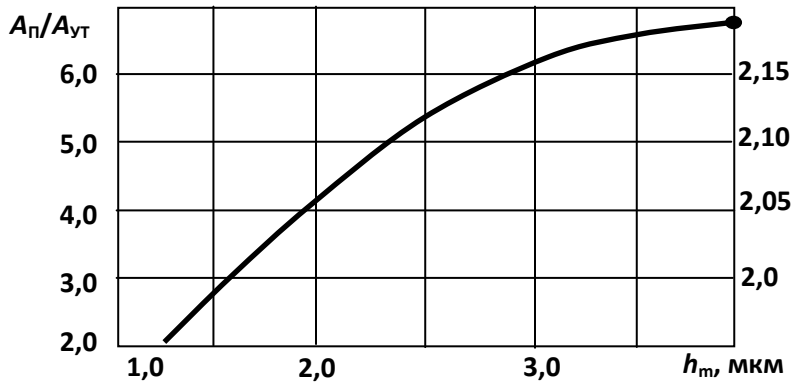


Рис. 3. Зависимость отношения работ, потраченных на питание подвеса A_{II} и потерянных с утечками через уплотняющую часть поршня A_U от средней высоты псевдопористой щели при $n_{OB} = 1500$ мин⁻¹, $\delta = 12$ мкм, $P_B = 1$ бар, $P_H = 3$ бар. Точкой обозначены параметры подвеса с дросселями в виде отверстий с диаметром 0,1 мм (6 отв.)

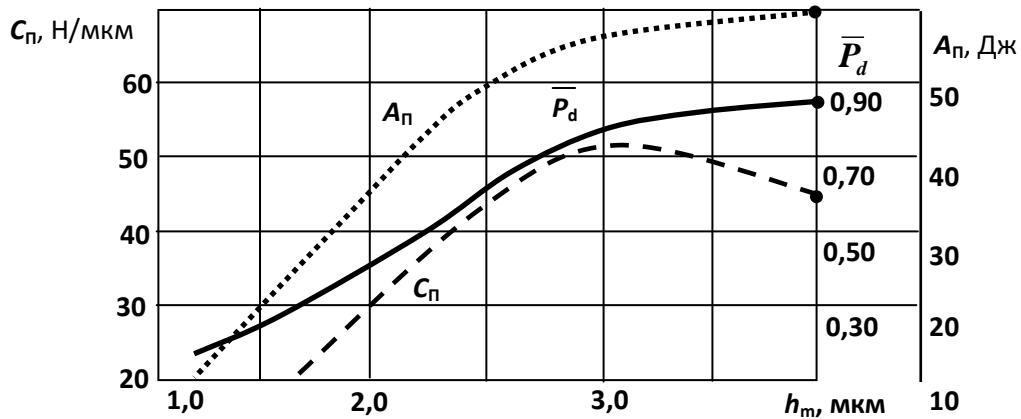


Рис. 4. Зависимость жесткости C_{II} , относительного давления наддува и работы, затраченной на питание подвеса A_{II} от средней высоты псевдопористой щели при $n_{OB} = 1500$ мин⁻¹, $\delta = 12$ мкм, $P_B = 1$ бар, $P_H = 6$ бар. Точками обозначены параметры подвеса с дросселями в виде отверстий с диаметром 0,1 мм (6 отв.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болштынский А. П., Белый В. Д., Дорошевич С. Э. Компрессоры с газостатическим центрированием поршня. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 406 с.
2. Пат. 20130058815 А1 США. Reciprocating compressor with gas bearing, US 13/602,744/ Donghan KIM, 2013.
3. Пат. 7415829 В 2 США. Piston compressor, US 10/537,639/Norbert Rolff, 2008.
4. Пат. 2098662 Российская Федерация, МПК F 04В 00/31. Бесконтактный компрессор / А. П. Болштынский, В. Е. Щерба. 1997. Бюл. № 34.
5. Пат. 2012140991 Российская Федерация, МПК F 04В 00/31. Компрессор с комбинированным механизмом привода /А. П. Болштынский, В. Е. Щерба, Е. А. Лысенко [и др.]. 2014. Бюл. № 10.
6. Лысенко Е. А. Конструкция и расчет маловибрационного поршневого компрессора с комбинированным механизмом привода: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2009. 20 с.
7. Ивахненко Т. А. Конструкция и расчет компрессора с газостатическим центрированием поршня и псевдопористыми питателями: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2010. 16 с.
8. Болштынский А. П., Ивахненко Т. А. Исследование течения газа в щелевых псевдопористых питателях газового подвеса поршня форвакуумнасоса // Вакуумная наука и техника: материалы ХУП науч. конф. / МГИЭМ. М., 2010. С. 123–126.

УДК 621.6.078

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКАХ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ГАЗОТРУБНОГО КОТЛА

А. Г. Михайлов, П. А. Батраков

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Течения газов в топках, как правило, турбулентные. При горении проблема турбулентности осложнена дополнительными факторами – химическими реакциями и излучением. На теплообмен в подобных устройствах влияют размеры и конфигурация топочной камеры, расположение и тип горелок, характеристики среды. Различные методы расчета теплообмена в топках дают противоречивые результаты. Действительным подтверждением результатов расчёта являются экспериментальные исследования. Для этой цели спроектирована и изготовлена экспериментальная установка для исследования радиационно-конвективного теплообмена при движении продуктов сгорания газообразного топлива в каналах различного профиля. Данная экспериментальная установка предназначена для моделирования и исследования процессов сложного теплообмена между высокотемпературным газовым потоком и холодной поверхностью канала. Приводится описание характеристик приборов и оборудования.

Ключевые слова: радиационно-конвективный теплообмен, газотрубный котел, экспериментальная установка.

I. ВВЕДЕНИЕ

Конечной целью любых исследований является получение количественных зависимостей, представленных как функции аргументов, известных непосредственно по постановке задачи. Теоретическое исследование может быть доведено до этой ступени только при условии полного аналитического решения задач. Однако в большинстве случаев довести аналитическое решение до получения количественных зависимостей удастся только путем существенных упрощений, которые дают лишь приближенную оценку и иногда могут привести к неправильным выводам. В настоящее время чисто аналитическое исследование ряда теплотехнических проблем является только принципиальной возможностью, практически не реализуемой из-за сложности и относительно высоких требований к точности и детальности решения поставленных задач. В связи с этим для решения задач прикладного характера, как правило, теоретические исследования приходится дополнять экспериментальными исследованиями [1, 2].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основные задачи экспериментальных исследований – проверка правильности теоретических предпосылок, качественное и количественное изучение протекающих процессов или отдельных явлений.

Экспериментальные исследования в наиболее общем случае состоят из следующих этапов:

- а) разработка физической модели процесса;
- б) составление программы и методики исследования;
- в) разработка стенда и специальных приборов для лабораторных исследований;
- г) сооружение стенда и изготовление специальных измерительных приборов, наладка стенда, проверка контрольно-измерительных приборов и проведение предварительных опытов с целью уточнения методики исследования;
- д) проведение лабораторных исследований;
- е) обработка результатов исследования, их анализ, корректировка физической модели или повторение лабораторных исследований;
- ж) составление окончательного отчета.

III. ТЕОРИЯ

На кафедре «Теплоэнергетика» ОмГТУ спроектирована и изготовлена экспериментальная установка для исследования радиационно-конвективного теплообмена при движении продуктов сгорания газообразного топлива в каналах различного профиля. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

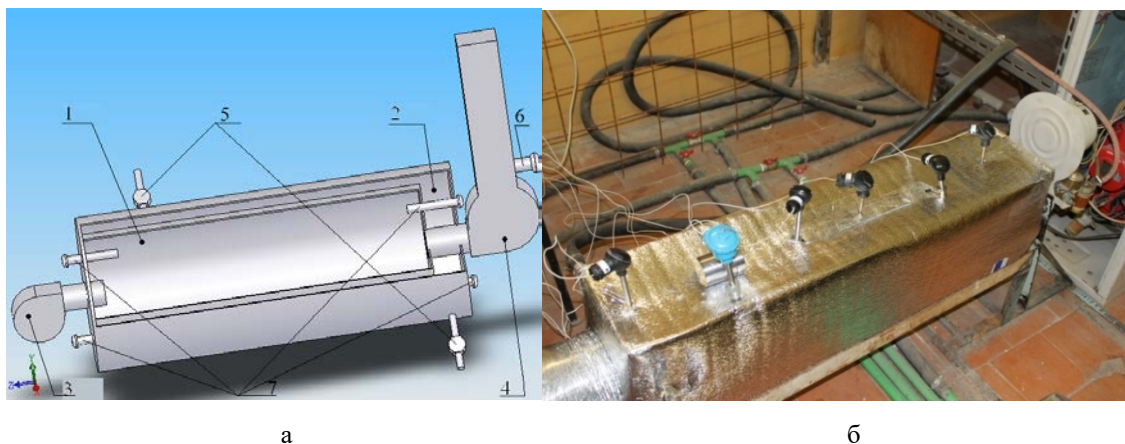


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки

Установка состоит из следующих основных узлов: горелки 3 с предварительной подготовкой топливоздушная смеси; камеры горения (топка) 1, которая находится внутри водяной рубашки 2; комплекса измерительных приборов 5, 6, 7 [1, 2]; дымовой трубы 4. В топке предусмотрено использование оребрения.

Для проведения анализа продуктов сгорания и измерения их температур по длине экспериментального участка имеются окна. Во время работы окна плотно закрываются водоохлаждаемыми заглушками.

Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду вся наружная поверхность корпуса водяной рубашки изолирована.

Для экспериментальных исследований используется жидкое или газообразное органическое топливо. Смесеобразование происходит в пределах корпуса горелки 3. Регулирование процесса смешения осуществляется с помощью изменения подачи топлива в горелку. В камере горения создается избыточное давление.

Продукты сгорания топлива, образующиеся в камере горения, отводятся через экспериментальный участок и удаляются через дымовую трубу 4 в атмосферу.

В экспериментальную установку включены также стационарные датчики, как датчики расхода воды 5 СГВ-15, хромель – копелевые термопары ДТПЛ (ХК) для измерения температуры воды и термопары ДТПК (ХА) 7, расположенные по всей длине топки, для определения температуры газа внутри топки, а также переносные контрольно-измерительные приборы: газоанализатор 6 «Testo 335» и инфракрасный пирометр Кк1200. Для измерения полусферических потоков лучистой энергии применяется радиометр.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате проведения экспериментальных работ определены следующие величины: температуры газа внутри топочного объема, температуры стенки топки, температуры охлаждающей жидкости, радиационная составляющая теплового потока и концентрация газовой смеси на выходе из топки.

При анализе экспериментальных данных и сравнении их с результатами расчетов для горения газообразного топлива в топке некруглого профиля с использованием ANSYS CFX [1, 3] установлено, что распределение температур газовой смеси по длине топки зависит от формы профиля топки. Характер изменения экспериментальных и теоретических кривых на графиках подобен (рис. 2, 3). Распределение максимальных температур находится в зоне формирования факела, а вне зоны идет понижение температур (рис. 2, 3).

Разница между теоретическим и экспериментальным распределением температур по длине топки (рис. 2, 3) составляет у эллипса 13,1 % (рис. 2), а у эллипса с поперечными ребрами – 14,3 % (рис. 3).

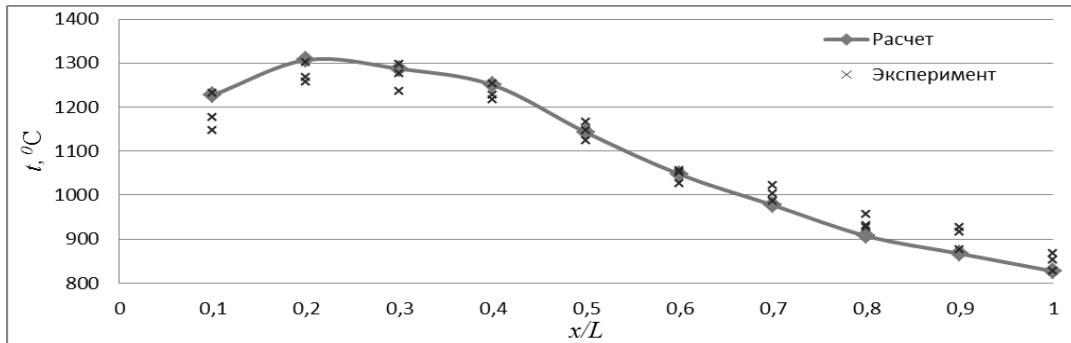


Рис. 2. – Графики зависимости экспериментальных и расчетных данных по распределению температур по длине топки с профилем в форме эллипс (неоребранный)

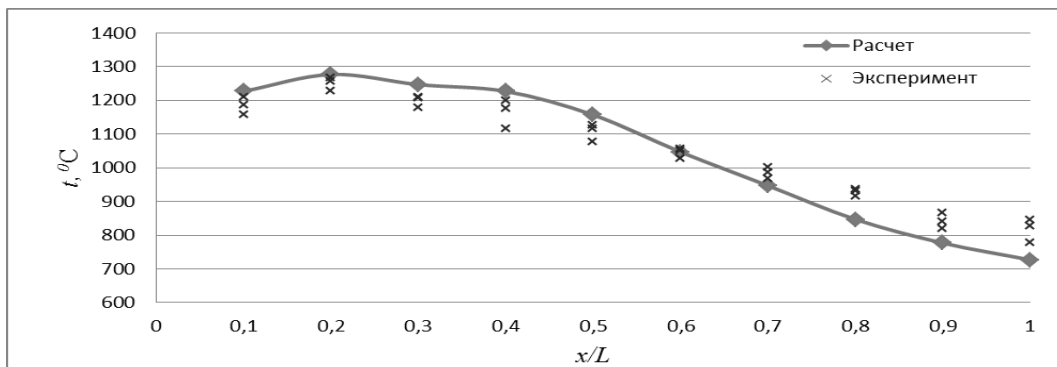


Рис. 3. – Графики зависимости экспериментальных и расчетных данных по распределению температур по длине топки с профилем в форме эллипс с ребрением внутри топочного объема

Проведение основных балансовых опытов является одним из наиболее ответственных этапов работы [1, 4]. Балансовые испытания производят при стабилизированном режиме работы котла.

Во избежание существенного изменения состояния поверхностей нагрева, что затрудняет анализ экспериментальных данных, балансовые испытания проводят в ограниченные сроки. Теплота сгорания газа, сжигаемого в период проведения серии опытов, не должна отклоняться более чем на $\pm 3\%$ от средней (для данного района). Опыты, проведенные при более значительных отклонениях Q_H , из рассмотрения исключаются. На каждой производительности в диапазоне от минимальной до максимальной следует проводить не менее четырех основных и контрольный опыты. Контрольный опыт выполняется вслед за основным с разрывом не менее суток, причем при организации контрольного опыта обязательно проводятся настройка и стабилизация режима заново [4, 5].

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тепловой баланс котла составляется как для получения представления о совершенстве использования теплоты и выяснения распределения потерь, так и для контроля правильности проведенных испытаний и увязки отдельных опытов между собой [4, 5].

КПД (брутто) котла по обратному балансу [1], %,

$$\eta_{\text{обр бр}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6),$$

где q_2 – потеря теплоты с уходящими продуктами горения, %; q_3 – потеря теплоты от химической неполноты горения, %; q_4 – потеря теплоты от механической неполноты горения с уносом, шлаком и провалом, %; q_5 – потеря теплоты в окружающую среду, %; q_6 – потеря теплоты с физической теплотой шлака, провала и уноса, %.

При сжигании жидкого и газового топлива $q_6 = 0$ и $q_4 = 0$, но при неудовлетворительном режиме горения возможно появление механического недожога в виде сажи даже при сжигании газового топлива. При испытании котельных агрегатов на жидком и газовом топливе численная оценка механического недожога практически невозможна. Наличие сажи может быть обнаружено при осмотре отложений на поверхностях нагрева остановленного котла или по окраске выбрасываемых в дымовую трубу продуктов горения.

Значения по балансовому расчету для топки с профилем вертикальный эллипс:

$\eta_{обр\ бр} = 53,5$ %; $q_2 = 35$ %; $q_3 = 1,5$ %; $q_5 = 10$ %, а для топки в форме вертикально расположенный эллипс с внутренним оребрением: $\eta_{обр\ бр} = 54,9$ %; $q_2 = 33,6$ %; $q_3 = 1,5$ %; $q_5 = 10$ %.

Физическая теплота топлива $I_{ф.т}$ учитывается в тех случаях, когда топливо перед поступлением в топку подогревается. Если подогрев топлива не производится, то принимают $I_{ф.т} = 0$.

При сравнении теоретических и опытных данных разница между теоретическим и экспериментальным распределением коэффициента полезного действия по длине топки (рис. 4) составляет 2,6 %.

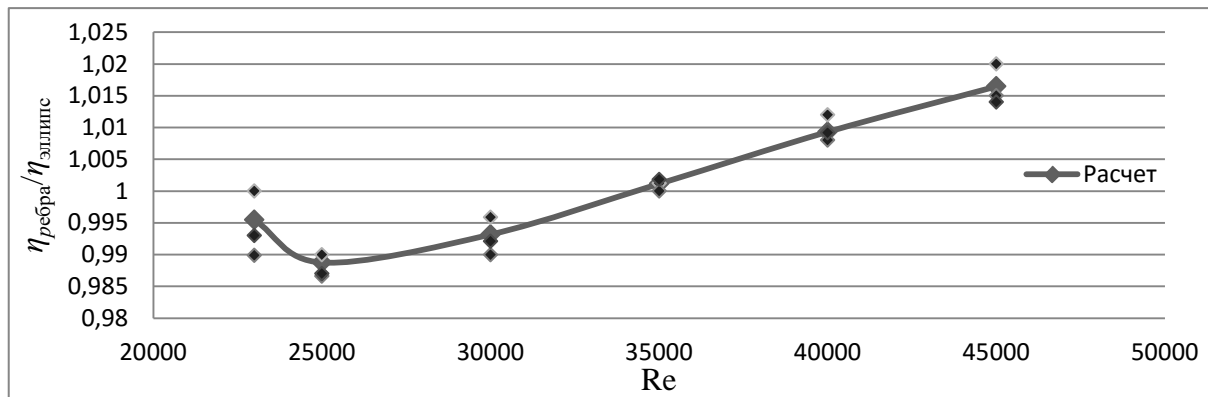


Рис. 4. Расчетные данные распределения $\eta_i/\eta = f(Re)$

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и спроектирована экспериментальная установка для изучения процессов теплопереноса, сопровождающихся турбулентным горением газообразного топлива.

2. Данная установка позволила определить следующие величины и характеристики топки: расход охлаждающей жидкости (воды); расход топлива (газа); температуры газовой смеси, температуры стенок, температуры охлаждающей жидкости; радиационную температуру (в дальнейшем радиационная составляющая теплового потока); экологические параметры данной установки (концентрации CO , CO_2 , NO_x , O_2 на выходе из топки).

3. Проведены сравнения теоретических и опытных данных. Полученные данные по распределению температур по длине топки подтверждают достоверность выполненных расчетов, расхождения для топки с формой в поперечном сечении эллипс составляют 13,1 % соответственно; для топки с формой в поперечном сечении эллипс с поперечными ребрами – 14,3 % соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов А. Г., Батраков П. А. Эффективные поверхности теплообмена в топке газотрубного котла: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 120 с.
2. Dyban E. P., Mazur A. I. Heat transfer for a planar air jet striking a concave // Journal of engineering physics. 1969. Vol. 17, no. 5. P. 1321–1325
3. Mikhailov A. G., Batrakov P. A., Terebilov S. V., Slobodina E. N. Gas-tube boilers: issues of classification and thermal calculation // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2014. Nov. P. 1–4.
4. Zarichnyak Yu. P., Platunov E. S., Sharkov A. V. Method for measurement of local thermal currents // Journal of engineering physics. 1975. Vol. 28, no. 2. P. 171–176.
5. Kamenetskii B. Ya. Calculation of heat transfer in boiler furnaces during firing of fuel in a bed // Thermal Engineering. 2008. Vol. 55, no. 5. P. 442–445.

УДК 621.5 + 621.89 + 621.179

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РОТОРА

Н. А. Райковский, Д. Б. Пономарев, С. А. Абрамов, В. Э. Пермяков, А. Г. Зырин
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – Цель исследования состоит в разработке методики измерения температуры трущейся поверхности высокоскоростного ротора при трибоисследованиях, а ее актуальность обусловлена широкой востребованностью таких систем измерений при исследованиях и диагностике температурного состояния узлов трения машин и агрегатов. Объектом исследования является поверхность трения ротора, который входит в состав экспериментального стенда для исследования триботехнических характеристик и процесса теплообмена между газом и поверхностями, образующими серповидный зазор подшипника скольжения турбоагрегата. Предложена методика измерения температуры, основанная на использовании автономного измерительного блока и термопар, установленных в роторе максимально близко к поверхности трения. Передача данных измерений производится по инфракрасному каналу на персональный компьютер. Измерение температуры проводится в четырех точках с разрешением $0,25^{\circ}\text{C}$ и погрешностью не более $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$. Для оценки точности разработанной системы измерения температуры использовались тепловизор FLIR E60 и измеритель ИТП-1. В результате разработана уникальная методика измерения температуры поверхности трения вращающегося ротора экспериментального стенда. Предложенная методика может использоваться для определения с высокой точностью величины коэффициента теплоотдачи при экспериментальных исследованиях процессов теплообмена в подшипниковых узлах трения скольжения.

Ключевые слова: температура поверхности, поверхность трения, коэффициент теплоотдачи, средства измерений, узел трения, вращающийся ротор.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время создание узлов трения с твердой смазкой в машинах и агрегатах является одним из актуальных направлений в современном машиностроении. Решение вопросов создания самосмазывающихся узлов трения имеет высокий приоритет, так как создание энергетических машин на базе таких трибосопряжений ведёт к отказу от системы смазки, что, в свою очередь, существенно сокращает расходы на проектирование, производство, эксплуатацию и обслуживание энергетической установки в целом, а также уменьшает массогабаритные характеристики агрегата [1].

Однако разработка таких узлов трения требует проведения значительных исследований и, соответственно, создание новых стендов и методов исследования. Одним из актуальных направлений для исследования являются системы охлаждения таких узлов трения [1, 2]. Одним из сложных вопросов при изучении теплообмена является измерение температуры поверхности трения вращающегося ротора [3] и температуры вспышки [4], что обусловлено невозможностью применения стандартных методов измерения, в том числе по причине больших угловых частот вращения ротора, стесненных условий размещения датчиков и системы измерения, высоких температур в области размещения средств измерения.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Погрешность методики определения теплообмена между охлаждающей средой и узлом трения определяется, прежде всего, методикой определения температуры поверхности трения вращающегося ротора, которая в большинстве случаев при исследовании узлов трения индивидуальна. Применение бесконтактных методов измерения температуры неприменимо ввиду конструктивных особенностей охлаждаемого подшипникового узла трения и изучаемых процессов. Измерение температуры контактными методами предполагает применение термопар в связи с их малыми габаритными размерами и прочностью. Прием сигнала с термопар различными токосъемниками (ртутный токосъем, щетки) неприемлем по причине сложности их устройства, наличия шумов, конструктивных особенностей экспериментального стенда.

Одним из современных способов передачи сигнала с вращающихся объектов являются радио и инфракрасные каналы передачи данных. Существующие системы измерения, выпускаемые промышленностью, дорогостоящие и неприменимы в условиях экспериментального стенда, так как имеют большие габаритные размеры и не имеют системы охлаждения устройства передачи сигнала, батареи и т.д.

Поэтому данная работа посвящена разработке методики измерения температуры поверхности трения вращающегося ротора, разработке способа ее реализации, выполнению комплекса испытаний и оценке погрешности предложенной методики.

III. ТЕОРИЯ

Объектом исследования является поверхность трения ротора, который входит в состав экспериментального стенда для исследования триботехнических характеристик и процесса теплообмена между охлаждающей средой и поверхностями образующими серповидный зазор подшипникового узла трения скольжения (Рис.1).

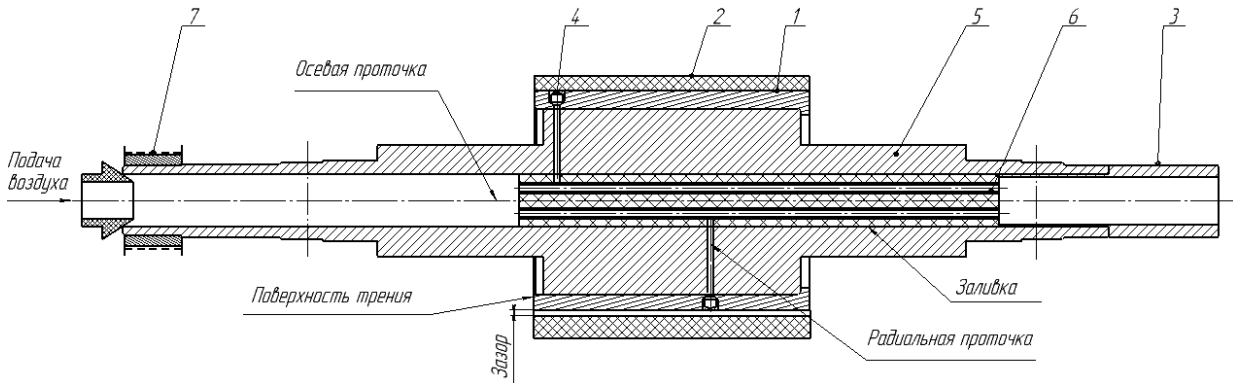


Рис. 1. Ротор в сборе:

1 – втулка, 2 – вкладыш подшипника, 3 – втулка для АИБ, 4 – гильза с термопарой, 5 – ротор, 6 – трубка, 7 – шкив.

При вращении ротора (рис.1) поверхность втулки 1 (рис. 1) трется о подшипник 2 с твердой смазкой. Во втулке 3 (Рис.1) размещен автономный измерительный блок (АИБ). Термопары, вблизи поверхности трения, установлены в гильзах 4 (рис. 1). От АИБ до гильз, термопары проведены через осевой и радиальные отверстия в роторе 5 (рис. 1). Во избежание перемещения проводов термопар в каналах ротора проточки залиты компаундом, в который установлены капиллярные воздухопроводы. Гильзы термопар установлены во втулке в натяг. Поверхность трения имеет твердость HRC 54 и шероховатость не более 0,32 мкм. При трении выделяется теплота, за счет чего повышается температура подшипника и ротора. Для обеспечения работоспособности автономного измерительного блока (максимальная рабочая температура соответствует 80°C) через каналы 6, выполненные в роторе продувается воздух (рис. 1). Крутящий момент к ротору подводится через шкив 7 при помощи ременной передачи от асинхронного электродвигателя. Система охлаждения экспериментального узла трения реализована в серповидном зазоре за пределами угла контакта трибосопряжения.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи на поверхности ротора определяется из уравнения:

$$\bar{\alpha} = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{O.C.2} - T_{O.C.1}) \cdot a}{(T_{O.C.} - T_{cm}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L \cdot K_{om}}, \quad (1)$$

где a – коэффициент распределения тепловых потоков;

c – теплоёмкость охлаждающей среды, Дж / К ;

T_{cm} – средняя температура трущейся поверхности ротора, °С;

ρ – плотность охлаждающей среды, кг / м³;

L – длина трущейся поверхности ротора, м ;

R – радиус трущейся поверхности ротора, м ;

$\bar{\alpha}$ – усреднённый по поверхности ротора коэффициент теплоотдачи, Вт / м² · К ;

$T_{O.C.1}$ – средняя температура охлаждающей среды на входе в зазор, °С;

$T_{O.C.2}$ – средняя температура охлаждающей среды на выходе из зазора, °С;

$T_{O.C.}$ – средняя температура охлаждающей среды в зазоре, °С;

- f – коэффициент трения;
- P – нагрузка на подшипник, Н;
- V_d – линейная скорость ротора, м/с;
- V – объемный расход охлаждающей среды, м³/с;
- $K_{ом}$ – коэффициент омывания поверхности ротора.

Определение всех составляющих данного уравнения, за исключением величины температуры поверхности ротора, не вызывает существенных трудностей. В связи с чем величина погрешности $\bar{\alpha}$ в данной задаче будет определяться, прежде всего, погрешностью методики измерения температур на поверхности трения ротора ($T_{ст}$).

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В сравнении с интегральными датчиками температуры и терморезисторами термопары имеют большую механическую прочность и приемлемую погрешность измерений при компенсации температуры холодных концов термопары. Наиболее универсальной и доступной, обладающей высокой стабильностью и линейностью в настоящее время является термопара типа хромель – алюмель (К-типа). Для определения абсолютной температуры по термоЭДС термопары целесообразно использовать интегральный преобразователь с термокомпенсацией [5] и далее передавать цифровой сигнал по беспроводному интерфейсу для анализа и обработки.

Функциональная схема разработанной системы измерения температуры поверхности вращающегося ротора представлена на рис. 1. В рабочем режиме вращения ротора автономный измерительный блок АИБ реализует следующие основные функции:

- измерение температуры поверхности трения ПТ вращающегося ротора в четырех точках посредством термопар ТП1...ТП4;
- определение датчиком оборотов ДО числа оборотов вращения ротора в секунду (минуту);
- беспроводную передачу данных по инфракрасному каналу ИК на персональный компьютер ПК.

Также при отсутствии вращения ротора АИБ позволяет обновить программное обеспечение через разъем последовательного интерфейса ПИ и произвести зарядку аккумулятора от внешнего источника постоянного напряжения 5В.

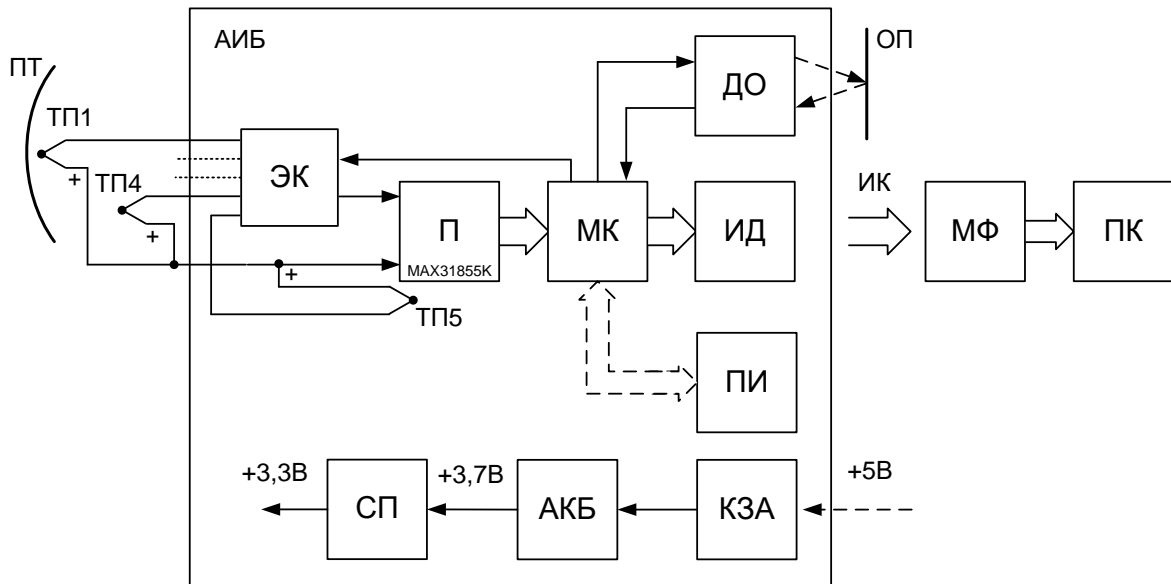


Рис. 2. Функциональная схема системы измерения температуры вращающегося ротора.

ПТ – поверхность трения, ТП1..ТП4 – термоэлектрические преобразователи, ТП5 – компенсационная термопара, АИБ – автономный измерительный блок, ЭК – электронный коммутатор, П – преобразователь сигнала с термопар, МК – микроконтроллер, ИД – инфракрасный диод, ПИ – последовательный интерфейс, ДО – датчик оборотов ротора, ОП – отражающая поверхность, КЗА – контроллер заряда аккумулятора, АКБ – аккумуляторная батарея, СП – стабилизатор питания, МФ – модуль фотоприемника, ПК – персональный компьютер

Автономный измерительный блок АИБ устанавливается внутри ротора. Основой АИБ является микроконтроллер МК типа ATmega328P в составе готового arduino совместимого модуля типа pro mini 3.3 V с кварцевым резонатором 8 МГц и стабилизатором питания СП. Микроконтроллером ATmega328P производится коммутация термопар и периодический опрос преобразователя. Электронный коммутатор ЭК реализован на n-канальных полевых транзисторах 2N7002, управляемых МК. Согласно схеме (рис. 2) положительные выводы термопар ТП1...ТП5 подключены к преобразователю П постоянно, а отрицательные включаются поочередно с интервалом 100 мс. В качестве преобразователя использована микросхема MAX31855K, имеющая последовательный цифровой интерфейс SPI. Температурное разрешение MAX31855K составляет 0,25°C, абсолютная погрешность измерений $\pm 2^\circ\text{C}$ при использовании термопары К-типа. Ошибка определения собственной температуры встроенным сенсором не превышает 0,3 °C при температуре корпуса до 80 °C.

Также МК считает обороты ротора в течение 1 секунды. Датчик оборотов ДО представляет собой датчик приближения – фотоинтерраптор КТ1R0811S. Каждые 1,5 секунды АИБ передает посылку данных измерений по инфракрасному каналу ИК на частоте модуляции 38 кГц. Передача данных со скоростью 1200 б/сек производится инфракрасным диодом ИД по шине TXD UART модулированной посредством внутреннего таймера ATmega328P. Модуль фотоприемника МФ на TSOP31238 осуществляет демодуляцию сигнала и передает посылку данных измерений на СОМ-порт персонального компьютера.

Питание АИБ производится с помощью литий-ионного аккумулятора АКБ емкостью 600 мА/ч. Средний потребляемый устройством ток составляет 30 мА. В качестве контроллера заряда аккумулятора КЗА использован готовый модуль MP1405 5В 1А с защитой от разряда и перезарядки аккумулятора. Включение устройства осуществляется вручную контактным соединителем в торце ротора.

Тарировка разработанной системы измерения температуры произведена посредством измерения температуры при остывании поверхности предварительно нагретого ротора в местах установки спаев термопар. В качестве эталонных приборов использованы портативный измеритель температуры ИТП-1 производства ОАО «НПП Эталон» и тепловизор FLIR E60 с применением контактной пленки с коэффициентом излучения 0,95. В результате эксперимента при комнатной температуре в показания СИТ для каждой термопары введена поправка на абсолютную аддитивную погрешность. Полученные результаты оценки погрешности СИТ представлены на рис.4.

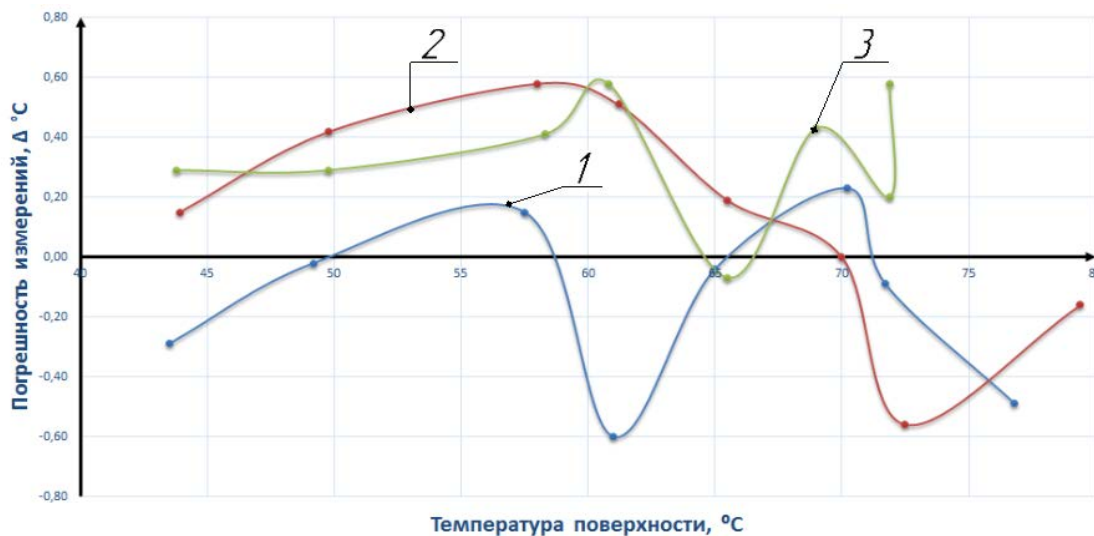


Рис. 4. Результаты оценки погрешности СИТ для трех термопар

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты, представленные на рис. 4, демонстрируют, что предложенный контактный метод измерения температуры поверхности трения вращающегося ротора показывает удовлетворительные результаты. Суммарная погрешность измерений составила 0,6 °C по модулю.

Следует отметить, что ввиду конструктивных особенностей и прогрева ротора разность температур между преобразователем и холодными концами термопар может достигать нескольких градусов. Соответственно, в показания измеренной температуры поверхности трения необходимо вводить поправку по разнице температуры преобразователя и компенсационной термопары ТП5.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для регистрации температур на поверхности трения вращающегося ротора экспериментального стенда была разработана уникальная, удовлетворяющая всем предъявляемым конструктивным и технико-экономическим требованиям, система измерения температуры.

Предложенная система измерения позволяет фиксировать температуру поверхности трения вращающегося ротора с разрешением $0,25^{\circ}\text{C}$ и погрешностью не более $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$. Таким образом, результаты измерения температуры, полученные при помощи реализованной системы измерения, являются адекватными и могут использоваться для определения с высокой точностью величины коэффициента теплоотдачи при экспериментальных исследованиях процессов теплообмена в подшипниковых узлах трения скольжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chichinadze A.V. Braun E. D. Interrelation of friction-wear and temperature characteristics of loaded opposite and similar friction couples under stationary and non-stationary regimes of friction // *Trenie i Iznos*. 2000. P. 158–166.
2. Velkavrh I., Ausserer F., Klient S. [et al.] The influence of temperature on friction and wear of unlubricated steel/steel contacts in different gaseous atmosphere // *Tribology International*. 2016. Vol. 98. P. 155–171. doi:10.1016/j.triboint.2016.02.022.
3. Balakin, V. A., Sergienko V. P., Lysenok Yu.V. Temperature problems of friction // *Trenie i Iznos*. 2002. P. 258–267.
4. Богданович П. Н., Ткачук Д. В. Влияния теплофизических свойств трущихся тел на температуру вспышки в высокоскоростном фрикционном контакте // *Трение и износ*. 2001. № 1. С. 10–17.
5. Штаргот Дж., Мирза С., Иоффе Д. Современные терморпары и $\Sigma\Delta$ -АЦП высокого разрешения обеспечивают прецизионное измерение температуры // *Компоненты и технологии*. 2012. № 1. С. 52–56.

УДК621.181.123

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ В ВАКУУМНОМ КОТЛЕ

Е.Н. Слободина, А.Г. Михайлов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. – Выполнен анализ развития котельной техники малой и средней мощности, обозначены возможные направления развития котлоагрегатов с целью повышения энергетической эффективности. Представлены технические обоснования для использования вакуумных котлов. Рассмотрены процессы теплообмена в вакуумном котле, где рабочее тело – кипящая вода. Рассмотрен метод интенсификации теплообмена при кипении с максимальным коэффициентом теплоотдачи.

В результате проведенных расчетных исследований получены кривые изменения коэффициентов теплоотдачи, в зависимости от давления, рассчитанные с использованием аналитической и численной методик.

Сделан вывод о возможности использования численного метода расчета с использованием RPI ANSYS CFX для описания процесса кипения в разреженной полости вакуумного котла.

Ключевые слова: вакуумный котел, кипение жидкости, капиллярная постоянная, теплоотдача, обребнение.

I. ВВЕДЕНИЕ

В развитии котельной техники малой и средней мощности выделяют несколько направлений:

- повышение энергетической эффективности путем снижения тепловых потерь и наиболее полного использования энергетического потенциала топлива;
- уменьшение габаритных размеров котлоагрегата за счет интенсификации процесса сжигания топлива и теплообмена в топке и на поверхностях нагрева;
- снижение токсичных (вредных) выбросов;
- повышение надежности работы котлоагрегата.

Анализ котельной техники малой и средней мощности от отечественных и зарубежных производителей показал, что в настоящее время наибольшее распространение получили горизонтальные жаротрубные котлы для производства пара и горячей воды [1 – 3].

Котлы данного вида требуют серьезных мер по химводоподготовке подпиточной воды. Для умягчения и обессоливания подпиточной воды используются весьма сложные установки, требующие для своей работы дорогостоящих компонентов. Также при эксплуатации возможны штрафные платы за сбросы солевого концентрата, который, помимо всего прочего, оказывает губительное воздействие на окружающую среду [1]. Данных проблем можно избежать, используя вакуумный водогрейный котел.

Особенность работы котла заключается в том, что хорошо очищенная вода не выводится из котла в процессе работы. Нет необходимости в регулярной химической подготовке котловой воды, качество которой является неперенным условием надежной и длительной работы котельного агрегата [1].

Использование вакуумного водогрейного котла в качестве источника тепла может решить ряд проблем, возникающих в процессе эксплуатации традиционного вида котельных агрегатов.

Эффективная работа вакуумного котла связана с интенсивным течением процессов кипения и конденсации. При этом за счет снижения рабочего давления в таком котле с учетом температуры кипения и достижения при этом максимальных коэффициентов теплоотдачи при кипении и конденсации пара, возможно значительное снижение массогабаритных характеристик котельного агрегата. Но, как известно, при давлениях ниже атмосферного процесс теплообмена ухудшается вследствие изменения интенсивности процессов кипения и конденсации. Данная статья посвящена вопросам интенсификации кипения.

Высокие значения коэффициентов теплоотдачи при давлениях ниже атмосферного возможно достичь только за счет использования способов интенсификации.

В данной статье рассмотрены особенности процесса кипения, а также предложен возможный метод интенсификации процесса кипения при давлениях ниже атмосферного.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Кипение – сложный процесс, условия протекания которого определяются различными теплофизическими факторами. Интенсивность кипения зависит от ряда термодинамических параметров и теплофизических свойств жидкости. Параметром, оказывающим наибольшее влияние на процесс кипения, является давление.

Со снижением давления из-за увеличения критического радиуса парового пузырька создаются значительные трудности в образовании паровой фазы на поверхности нагрева, что приводит к существенному изменению внутренних характеристик процесса кипения – скорости роста, отрывного диаметра, частоты отрыва паровых пузырьков. При этом растягивается переходный режим кипения, характеризующийся неустойчивостью, нестационарностью процесса парообразования и нестационарностью теплообмена [4].

Поэтому для интенсификации процесса кипения необходимо использовать метод, учитывающий все изменения, происходящие при пониженном давлении, и снижающий риски возникновения неустойчивого кипения. В качестве метода интенсификации возможно использовать оребрение (рис. 1).

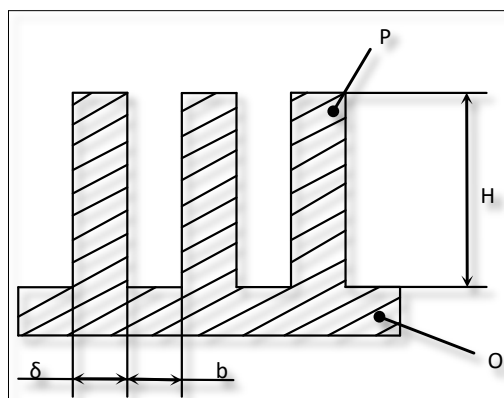


Рис. 1. Расчетная схема оребренной поверхности

Геометрические характеристики ребра (высота (H), длина (l), толщина (δ), а также зазор между соседними ребрами (b)), для получения максимального эффекта, должны рассчитываться с высокой точностью, определяющим фактором является давление. К примеру, зазор между ребрами не должен превышать величины капил-

лярной постоянной кипящей жидкости, во избежание, в том числе возникновения кризиса кипения. Данная статья посвящена исследованию геометрических параметров ребра, с целью получения максимального эффекта при интенсификации процесса кипения жидкости в разреженном объеме вакуумного котла.

III. ТЕОРИЯ

Существуют различные методики для расчета коэффициентов теплоотдачи (α) при кипении жидкости. Так как коэффициент теплоотдачи жидкости зависит только от режимных параметров (q , p), поэтому для практических расчетов применяются эмпирические зависимости [4, 5]. Расчеты показали, что при использовании различных методик результат не изменяется. Наблюдается тенденция снижения коэффициентов теплоотдачи при уменьшении давления [6]. Снижение коэффициентов теплоотдачи свидетельствует о снижении интенсивности процесса теплообмена в целом. Данный факт недопустим, поэтому принято решение интенсифицировать процесс с применением оребрения в зоне кипения.

При организации процесса кипения в системе капиллярных щелевых каналов для получения наибольшего эффекта учитывается значение величины капиллярной постоянной кипящей жидкости, которое рассчитывается по формуле [7]:

$$l_o = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{ж}-\rho_{п})}}, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения кипящей жидкости; g – ускорение силы тяжести; $\rho_{ж}$, $\rho_{п}$ – плотность жидкости и пара.

Параллельно учитывается критический радиус парового пузырька, который изменяется пропорционально изменению давления. Формула для расчета приведена ниже:

$$R_{кр} = \frac{2\sigma T_n}{r \rho_n (T_c - T_n)}, \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; ρ_n – плотность пара; r – теплота парообразования; T_c – температура стенки; T_n – температура насыщения [4].

Основываясь на значениях выше указанных характеристик, делаем вывод о том, что величина щелевого зазора подбирается с учетом критического радиуса пузырька и при этом не должна превышать величину капиллярной постоянной кипящей жидкости [4,7].

Что касается, высоты ребра оптимальную величину можно подобрать с учетом эффективности ребра, формула для расчета приведена ниже:

$$E = t \left(\frac{H}{\delta} \right) \sqrt{2Bi} / \frac{H}{\delta} \sqrt{2Bi}, \quad (3)$$

В работе [7] представлено расчетное уравнение для нахождения коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости на оребренной поверхности в капиллярных каналах при двумерной постановке. Данное выражение позволяет оценить получаемый эффект от оребрения.

Но аналитическое решение задачи о распространении теплоты в ребре и объеме жидкости при многомерной постановке связано со значительными трудностями. Не всегда возможно учитывать теплообмен с торцевой поверхности ребра.

Для получения наиболее достоверных результатов необходимо использовать сочетания двух методик – аналитической и численной.

В качестве численной методики возможно использовать модель кипения RPI. В данной модели процесс кипения, сопровождающийся конвекцией, рассматривается в системе каналов. Модель RPI состоит из уравнений неразрывности для жидкой и газовой фаз, уравнения сохранения импульса для жидкой и газовой фаз, уравнения сохранения энергии для жидкой фазы, уравнения для концентраций на границе раздела фаз и уравнений в частных производных для турбулентности в жидкой фазе [8]. Также задаются начальные и граничные условия.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате проведенных расчетных исследований получены кривые изменения коэффициентов теплоотдачи в зависимости от давления, рассчитанные с использованием аналитической и численной методик.

На рис. 2 представлены кривые сравнения расчетных, с использованием корреляционных уравнений, и экспериментальных данных авторов (В.П. Исаченко, В.А. Осипов, А.С. Сукомел, Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков) [6]. Сравнение осуществлялось с расчетами при подобных условиях, полученными в программном комплексе ANSYS-CFX. На рис. 3 представлено расчетное соотношение $a_{пр}/a_{пл}$, где $a_{пр}$ – коэффициент теплоотдачи на оре-

бренной поверхности, $a_{г\ell}$ – коэффициент теплоотдачи на гладкой поверхности, переменной величиной является давление в разреженном объеме. Расчеты производились с корректировкой для давлений ниже атмосферного.

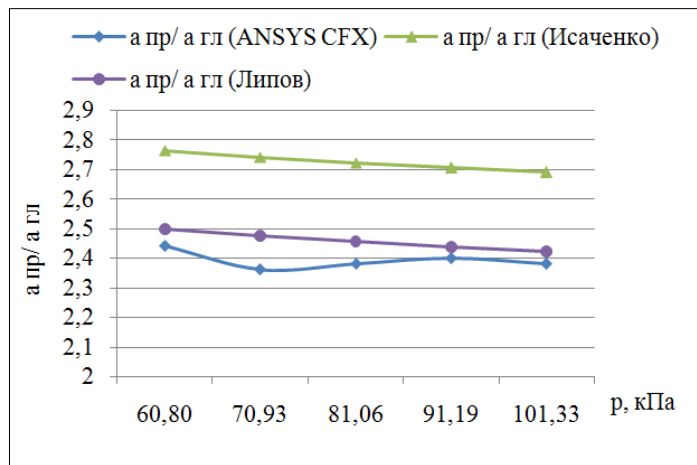


Рис. 2. Сравнение результатов расчета относительных коэффициентов теплоотдачи при кипении по различным методикам

Зафиксировав давление на максимальном значении коэффициента теплоотдачи (60 кПа), проведен анализ влияния геометрии ребра. При фиксированном значении высоты изменялась длина ребра, диапазон изменений составил от 0,005 до 0,1 м, при этом щелевой зазор находится в диапазоне от 0,001 – 0,01 м. Полученные расчетные данные позволили выделить геометрические характеристики с максимальным эффектом от оребрения.

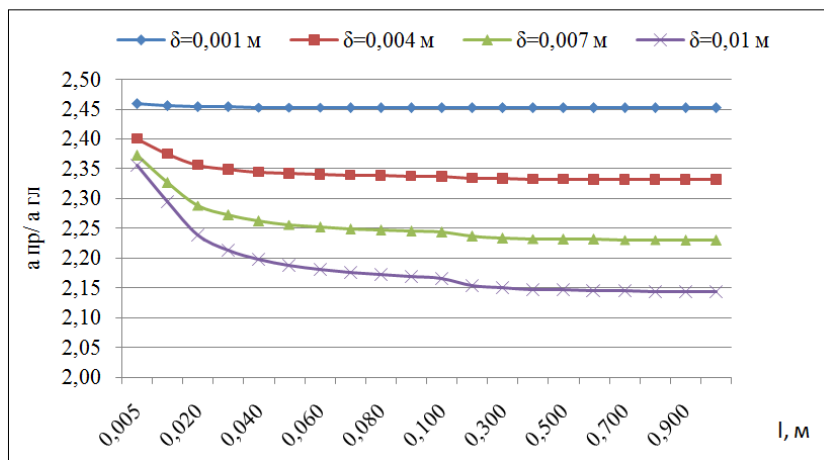


Рис. 3. Зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от геометрических характеристик оребренной поверхности

На рис. 3. отображена зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от геометрических характеристик оребренной поверхности.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среднее расхождение значений коэффициентов теплоотдачи (рис. 3), полученных при расчетном моделировании процесса теплообмена при кипении находится в пределах от 2 до 12 % при заданном давлении от 60 до 101 кПа.

Максимальное расхождение между численными значениями и аналитическими, рассчитанными по методике Ю.М. Липова, Ю.М. Третьякова, минимальны при заданных начальных и граничных условиях. Что объясняется влиянием неравномерного распределения температур на нагреваемой поверхности и наличием конвективных явлений.

Согласно расчетным данным, можно сделать вывод, что уменьшение длины ребра (l) (рис. 4) приводит к увеличению удельного влияния теплообмена на боковой поверхности при условии, что величина площади торцевой поверхности ребра стремится к минимальным значениям. Таким образом, можно утверждать о том, что наиболее эффективный вариант оребрения для интенсификации процесса кипения жидкости является применение ребер в виде шипов прямоугольного профиля с учетом щелевого зазора, который не должен превышать капиллярной постоянной. При данных условиях происходит рост приведенного коэффициента теплоотдачи.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Проведенные исследования показали, что при моделировании процесса теплообмена с использованием методики кипения RPI по сравнению с аналитическими методиками находится в пределах от 2 до 12 % при заданном давлении от 60 до 101 кПа. Минимальные расхождения наблюдаются при сравнении с методикой Ю.М. Липова, Ю.М. Третьякова, при заданных начальных и граничных условиях, с корректировкой для давлений ниже атмосферного. Таким образом, численный метод расчета RPI ANSYS CFX возможно использовать для описания процесса кипения в разреженной полости вакуумного котла.

По результатам расчета можно сделать вывод о том, что наиболее эффективный вариант оребрения для интенсификации процесса кипения жидкости является применение ребер в виде шипов прямоугольного профиля с учетом щелевого зазора, который не должен превышать капиллярной постоянной. Данное техническое решение возможно для применения в разреженном объеме вакуумного котла для интенсификации процесса кипения, приводящее к уменьшению габаритных размеров котлоагрегата.

Работа выполнена в рамках НИР № 16123В «Молодой ученый ОмГТУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Б. А. Котельные установки и их эксплуатации. М.: Академия, 2005. 432 с.
2. Annaratone D. Steam generators. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 2008. 434 p.
3. Mikhailov A. G., Batrakov P. A., Terebilov S. V., Slobodina E. N. Gas-tube boilers: issues of classification and thermal calculation // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2014. P. 1–4.
4. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. 5-е изд. М.: Арис, 2014. 416 с.
5. Feldmann H., Luke A. Nucleate boiling in water for different pressures // International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July. 2008. P. 14–17.
6. Слободина Е. Н. Влияние процесса кипения в разреженной полости на эффективность работы вакуумного котла // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2015. № 3(143). С. 185–187.
7. Корнеев С. Д., Пименова Е. Л., Костюков В. М. [и др.] Влияние теплофизических свойств материала оребренной поверхности на выбор ее оптимальных геометрических характеристик // Известия МГИУ. 2006. № 1(2).
8. Inc. ANSYS. ANSYS-CFX-Solver Theory Guide, 12.1 edn., November 2009.

УДК 621.512:621.651

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РОТАЦИОННОЙ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ОБЪЕМНОГО ДЕЙСТВИЯ

В. Е. Щерба, В. В. Шалай, Е. А. Лысенко, Г. А. Нестеренко, А. К. Кужбанов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В статье описывается устройство ротационной гибридной энергетической машины объемного действия. Представлены основные требования по проектированию и изготовлению РГЭМОД. Приведены основные результаты расчетов некоторых деталей и узлов.

Ключевые слова: ротационная гибридная энергетическая машина объемного действия.

I. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа проведена в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской разработки «Разработка ротационной гибридной энергетической машины объемного действия» в соответствии с техническим заданием НИР № 14.0068П, которое подразумевает разработку и создание роторной гибридной энергетической

машины объемного действия (РГЭМОД) нового типа, предназначенной для производства энергии в виде сжатого газа и жидкости под давлением, с уменьшенной материалоемкостью (до 30 %, за счет агрегатирования двух машин компрессора и насоса), с повышенной энергоэффективностью (не менее 5%, за счет использования жидкостного охлаждения стенок рабочей камеры и тела рабочего органа компрессорной секции) по сравнению с неагрегатированными машинами.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Совмещение рабочих процессов и конструкций компрессоров и насосов (агрегатирование с разной степенью совмещения рабочих камер) с целью существенного повышения энергоэффективности (не менее 5%) компрессоров средней и малой производительности с одновременным снижением общей материалоемкости агрегата на 30% и более процентов позволяет:

- достичь энергоэффективности за счет использования жидкостного охлаждения стенок рабочей камеры и тела рабочего органа;
- снизить материалоемкость за счет использования единого привода и корпусной платформы при размещении в них одновременно компрессора и насоса;
- одновременно и попеременно сжимать газ и жидкость;
- увеличить допустимую степень повышения давления в одной ступени газовой полости на 20 – 30% по сравнению с обычными машинами объемного действия;
- попеременно использовать в одной машине разные по свойствам и составу неагрессивные жидкости и газы для подачи различным потребителям.

В связи с этим была разработана конструкция, отвечающая выше перечисленным требованиям.

III. ТЕОРИЯ

Конструкция РГЭМОД, приведенная на рис.1 позволяет сочетать в себе оптимальные массогабаритные параметры с их требуемой надежностью и работоспособностью.

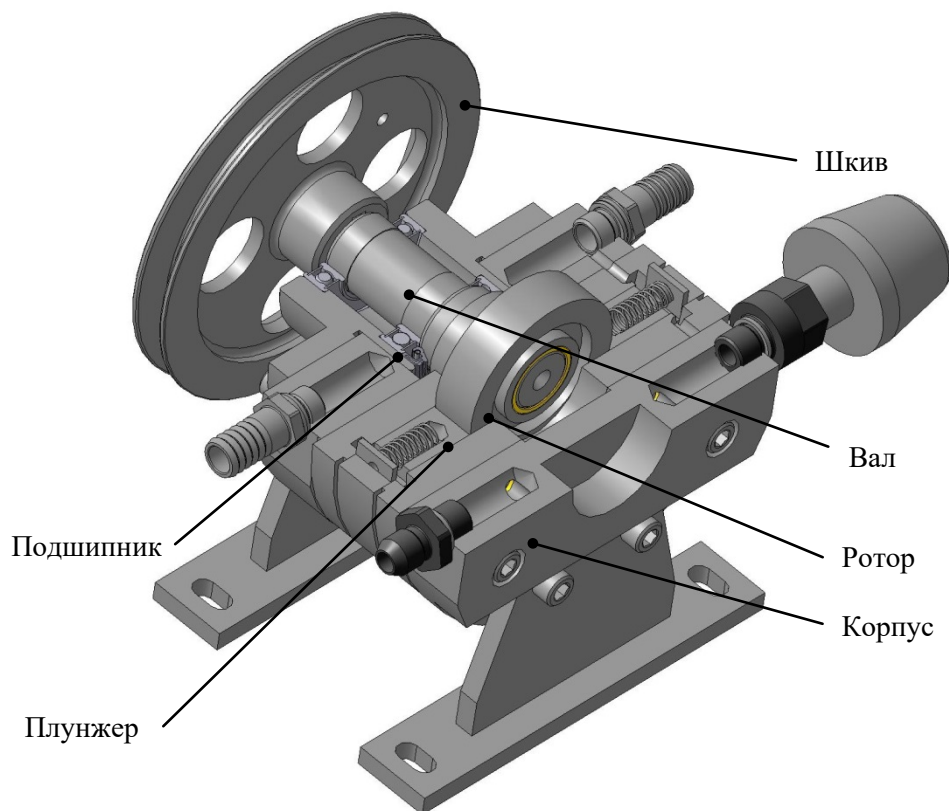


Рис. 1. Устройство механизма нагнетателя

Эффективную работу РГЭМОД можно получить только при условии обеспечения минимально возможных торцевых зазоров между ротором и торцевыми крышками корпуса [1].

Это условие обеспечивается двумя основными факторами:

- точностью изготовления и сборки, которая зависит от точности технологического оборудования, оснастки, правильном выборе технологических баз и квалификации рабочих;
- динамической жесткостью приводного эксцентрикового вала.

Наиболее нагруженной деталью механизма нагнетателя является эксцентриковый вал, передающий крутящий момент со шкива на ротор и испытывающий значительные нагрузки по изгибающему и крутящему моментам. Расчёт методом конечных элементов будет произведён для данного узла.

Наибольшая нагрузка на вал передаётся от максимально возможного усилия со стороны насосной секции при рабочем ходе ротора и крутящего момента.

Расчёт вала на жёсткость заключается в определении прогибов, углов наклона оси вала.

Расчет вала был произведен при помощи программы COSMOSWorks.

При расчете использовалась объёмная конечно-элементная сетка со средним размером сторон элементов 2,654 мм, конечно-элементная модель представлена на рис. 2. Общее число элементов – 58065, число узлов – 84499.

В расчёте рассмотрен случай для максимальной нагрузки (при среднем положении ротора). Нагрузки, приложенные к деталям механизма, равны максимальному усилию действующего от давлений в насосной и компрессорной секциях. Закрепления осуществлены шарнирно в подшипниках.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для указания размерности физических величин в тексте статьи допускается использование единиц системы СИ. Использование внесистемных единиц допускается лишь в тех случаях, когда это является общепринятым стандартом обозначения в той или иной отрасли.

Для проведения расчетов была составлена конечно-элементная модель вала (Рис. 2) с указанием мест приложения сил.

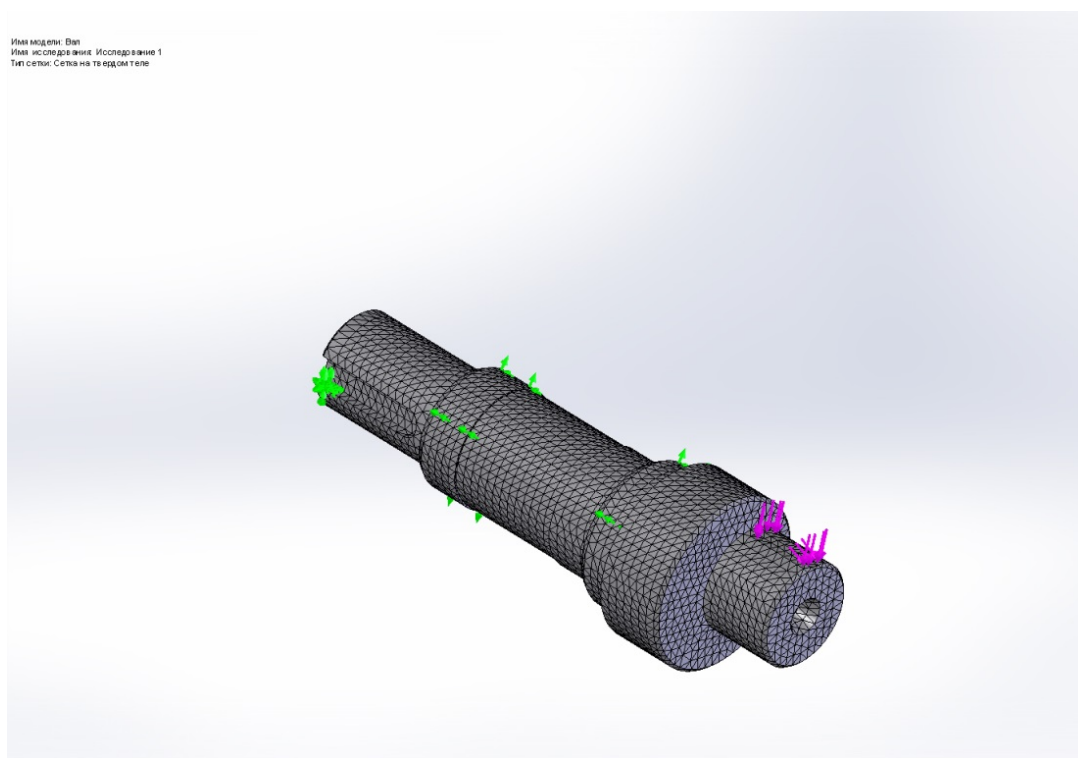


Рис. 2. Конечно-элементная модель вала

В результате проведенных расчетов была получена диаграмма перемещений эксцентрикового вала (рис. 3), на котором показаны участки, подвергающиеся наибольшей деформации в процессе работы РГЭМОД.

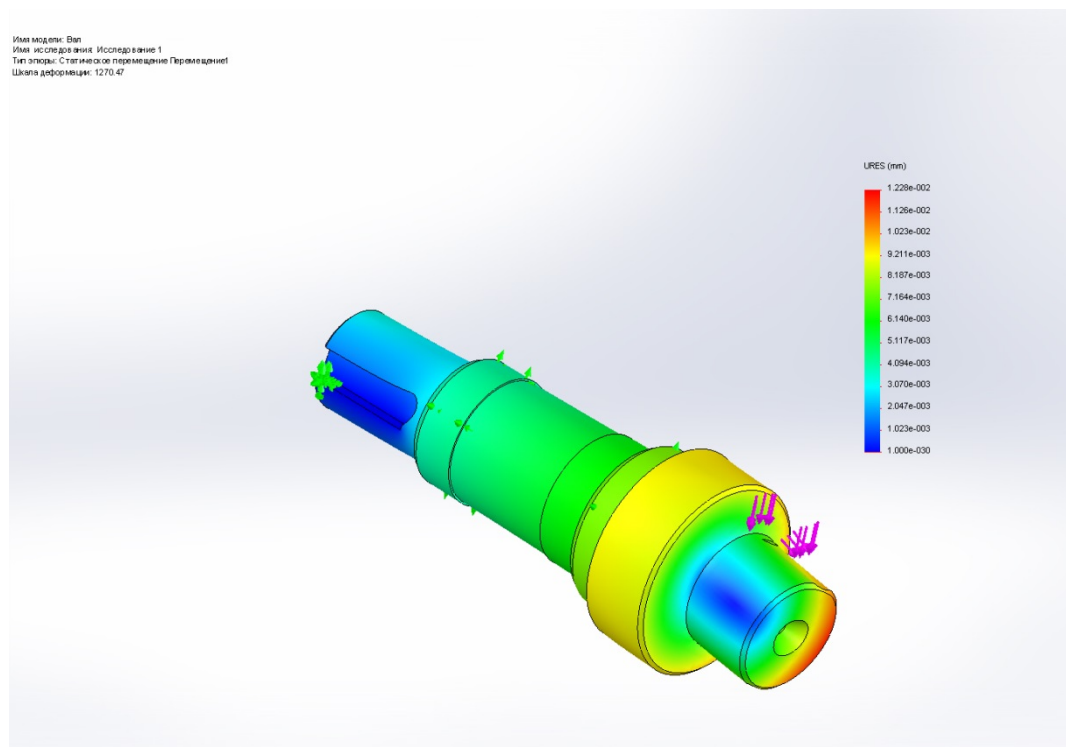


Рис. 3. Диаграмма перемещений

По результатам расчётов методом конечных элементов можно сделать заключение, что спроектированный эксцентриковый вал отвечает заданным требованиям.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При проектировании РГЭМОД необходимо назначать торцевые зазоры между ротором и торцевыми крышками, исходя из требований герметичности в сочетании с требованиями жёсткости и работоспособности изделия.

2. Требование жёсткости эксцентрикового вала должно обеспечивать минимальные массогабаритные показатели в сочетании с минимальными прогибами конца вала в условиях действия максимальных нагрузок со стороны ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щерба В. Е., Болштынский А. П., Шалай В. В., Ходорева Е. В. Насос-компрессоры. Рабочие процессы и основы проектирования: моногр. М.: Машиностроение, 2013. 368 с.

УДК 621.51

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ТИХОХОДНОЙ ДЛИННОХОДОВОЙ СТУПЕНИ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

В. Л. Юша, С. С. Бусаров, Р. Ю. Гошля, А. В. Недовенчаный,
И. С. Бусаров, Д. С. Титов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – До настоящего времени отсутствуют экспериментальные данные по параметрам состояния газа в рабочей камере тихоходных длинноходовых ступеней. Для исследования рабочих процессов поршневых воздушных тихоходных длинноходовых компрессоров с линейным приводом разработан стенд с целью получения экспериментальных данных по параметрам состояния газа в рабочей камере, а также сравнение полученных результатов, с результатами математического моделирования. Для измерения давления применён датчик ДД6,0, а для измерения мгновенной температуры газа разработан дат-

чик температуры на базе «бусинкового» термистора. Получены экспериментальные зависимости мгновенных параметров состояния газа (давления и температуры) в рабочей камере при водяном охлаждении цилиндра для различных режимов работы и без охлаждения рабочей камеры. Экспериментально подтверждено существенное влияние внешнего охлаждения на температурный режим тихоходной длинноходовой ступени. А также получение удовлетворительных результатов при сравнении экспериментальных данных и данных полученным с помощью математической модели.

Ключевые слова: длинноходовой поршневой компрессор, температура нагнетания, индикаторная диаграмма, температурная диаграмма.

I. ВВЕДЕНИЕ

Теоретическая оценка режимов работы поршневых тихоходных длинноходовых компрессоров, выполненная на базе разработанной математической модели, показала эффективность применения таких ступеней особенно при использовании интенсивного внешнего охлаждения ступени [1, 2]. В существующей литературе [3, 4, 5] авторами предложены методики расчёта рабочих процессов для конкретных машин, параметры которых (соотношение диаметра и хода поршня) существенно отличаются от параметров исследуемой ступени [8]. Таким образом, проведение экспериментальных исследований рабочих процессов тихоходных длинноходовых компрессоров является актуальной задачей.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача проводимых экспериментальных исследований – получение удовлетворительных результатов при сопоставлении экспериментальных данных и результатов математического моделирования.

Целью экспериментальных исследований являлось подтверждение проведённых ранее теоретических исследований [1, 2, 8] и одновременно получение данных для данной конкретной ступени по расчёту коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности рабочей камеры.

III. ТЕОРИЯ

Для проведения экспериментальных исследований разработан экспериментальный стенд с линейным приводом. На рис. 1 представлена измерительная схема поршневого компрессора.

Стенд состоит из рамы с двумя ярусами. На нижнем ярусе располагается бак для масла и насосный агрегат для подачи масла к гидроцилиндру. На верхнем ярусе расположены фильтр, дроссель, обратный клапан, гидрораспределитель, гидроцилиндр и одноступенчатый поршневой компрессор.

Поршень 1 приводится в движение через шток 2 от штока гидроцилиндра, который, в свою очередь, приводится в действие от гидроаккумуляторной станции. Поскольку разработанная ступень является ступенью без смазки, уплотняющие манжеты 3, установленные на поршне 1, изготовлены из самосмазывающегося материала капролона. Основание 4 устанавливается на общую фундаментную раму. Поршень 1 движется в цилиндре 5. В верхней части ступени установлена клапанная плита 6. Эта плита выполнена гладкой с отфрезерованными пазами и отверстиями для установки оборудования. Над плитой располагается крышка 7. Между плитой 6 и крышкой 7 образуется полость, через которую можно прокачивать как воздух, так и воду, тем самым меняя режим охлаждения. Датчик давления 10 и датчик температуры 9 используются для определения соответственно давления и температуры сжимаемого газа в рабочей камере. В плиту 6 вмонтированы термопары 8 для определения температуры внутренней и внешней поверхности плиты 6. Регистрация данных с термопар происходит с помощью вольтметра 11. Данные с датчика температуры и датчика давления поступают на цифровой осциллограф 13 через усилитель 12 и выводятся на экран персонального компьютера 14.

Экспериментальные исследования длинноходовой тихоходной ступени проводились при следующих условиях однозначности: геометрические условия – диаметр цилиндра – 0,15 м; ход поршня – 0,2 м; граничные условия – температура охлаждающей среды – 298К, охлаждающая среда – вода; физические условия – сжимаемый газ – воздух; начальные условия – начальная температура газа – 293 К, давление всасывания – 0,1 МПа, давление нагнетания – 0,3 – 0,5 МПа.

Для получения экспериментальных данных был использован датчик давления ДД6,0 и датчик температуры, выполненный на базе «бусинкового» термистора [12, 13] (рис.2).

Принципиальная измерительная схемы изображена на рис. 1. При запуске гидростанция начинает работать в замкнутом режиме со сбросом рабочей жидкости в бак до тех пор, пока с блока управления не придёт сигнал управления соленоидом гидрораспределителя. После срабатывания соленоида рабочая жидкость поступает в рабочую полость гидроцилиндра, и ПК начинает работать. С помощью цифрового осциллографа 13 на монитор

персонального компьютера 14 выводились графики изменения температуры и давления внутри полости цилиндра.

Эксперимент проводился при двух режимах охлаждения стенок рабочей камеры: с интенсивным охлаждением путем прокачки воды через рубашку цилиндра и без водяного охлаждения.

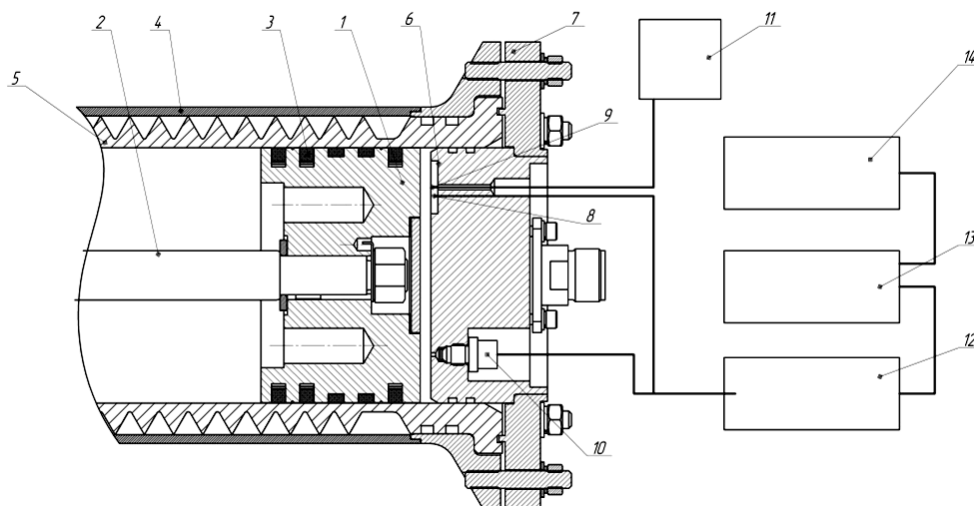


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – поршень; 2 – шток; 3 – уплотняющие кольца; 4 – основание; 5 – цилиндр; 6 – плита; 7 – крышка; 8 – термопары; 9 – датчик температуры; 10 – датчик давления; 11 – милливольтметр; 12 – усилитель; 13 – электронный осциллограф; 14 – персональный компьютер



Рис. 2. Зонд для измерения температуры.
Датчик температуры на базе «бусинкового» термистора

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРЕМЕНТОВ

Полученные экспериментальные результаты подтверждают данные, полученные при математическом моделировании, что в дальнейшем позволит получать результаты с помощью математической модели без проведения дорогостоящих экспериментов. Так же получено экспериментальное подтверждение эффективности применения внешнего охлаждения для рассматриваемых ступеней.

Погрешность измерения мгновенной температуры при использовании бусинкового термистора [10].

$$\delta_{\theta} = \sqrt{\delta_l^2 + \delta_t^2 + \delta_v^2 + \delta_F^2}, \quad (1)$$

где δ_l – погрешность мультиметра, определяемая погрешностью прибора, 0,34%;

δ_t – погрешность термометра, определяемая погрешностью прибора, 0,1%;

δ_V – погрешность вольтметра, определяемая погрешностью прибора, 0,3%;

δ_F – погрешность расчёта по полученной интерполированной формуле, 1,5%.

$$\delta_D = \sqrt{0,34^2 + 0,1^2 + 0,3^2 + 1,5^2} = 1,57\% .$$

Разница между экспериментальными и расчётными данными по температуре газа – не более 7,5%.

Погрешность настройки времени цикла определяется точностью электронного осциллографа и составляет 0,05%.

Определим приборную погрешность [9] при тарировке датчика давления, определяемую по формуле [11]:

$$\delta_{ДД} = \sqrt{\delta_D^2 + \delta_{МН}^2 + \delta_O^2} , \quad (2)$$

где $\delta_{Д}$ – относительная погрешность датчика давления, %;

$\delta_{МН}$ – относительная погрешность образцового манометра, %;

δ_O – относительная погрешность осциллографа, %.

Относительная погрешность датчика давления по паспорту $\delta_{Д}=1,4\%$. Относительная погрешность образцового манометра $\delta_{МН}=1\%$. Относительная погрешность для осциллографа определяется паспортом $\delta_O=0,05\%$. В данном случае приборная погрешность является общей погрешностью, поскольку методика измерения напряжения при выполнении эксперимента и при проведении тарировки совершенно одинаковы. Также не учитывалось влияние случайных факторов. Их можно будет исключить, если некоторые значения, полученные при экспериментальном измерении, будут выпадать из общей системы. Тогда общая погрешность датчика давления равна

$$\delta_{ДД} = \sqrt{1,4^2 + 1^2 + 0,05^2} = 1,72\% .$$

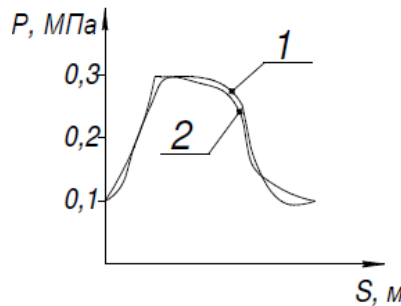


Рис. 3. Развернутая индикаторная диаграмма при времени цикла 2 с ($P_H=0,3$ МПа):
1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

На рис. 3 представлены индикаторные диаграммы, полученные экспериментально и расчётным путём для давления нагнетания – 0,3 МПа. Видна удовлетворительная сходимость результатов в течение всего процесса.

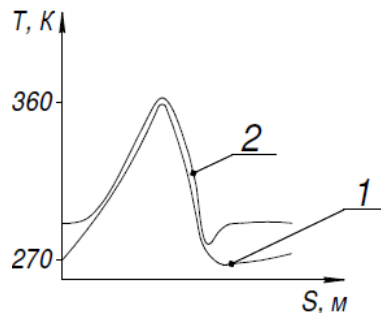


Рис. 4. Изменение мгновенной температуры газа в рабочей камере при времени цикла 2 с, без водяного охлаждения ($P_H=0,3$ МПа):
1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

На рис. 4 представлены зависимости мгновенной температуры газа в рабочей камере, полученные экспериментально и расчётным путём для режима без интенсивного охлаждения. Видна удовлетворительная сходимость результатов в процессе сжатия и нагнетания и большая разница результатов экспериментальных исследований и теоретического расчёта в процессе обратного расширения и всасывания.

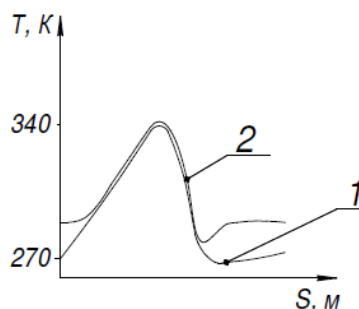


Рис. 5. Изменение мгновенной температуры газа в рабочей камере при времени цикла 2 с, с интенсивным водяным охлаждением ($P_H=0,3\text{МПа}$):
1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

На рис. 5 представлены зависимости мгновенной температуры газа, в рабочей камере полученные экспериментально и расчётным путём для режима с интенсивным охлаждением. Видна удовлетворительная сходимость результатов в процессе сжатия и нагнетания и большая разница результатов экспериментальных исследований и теоретического расчёта в процессе обратного расширения и всасывания.

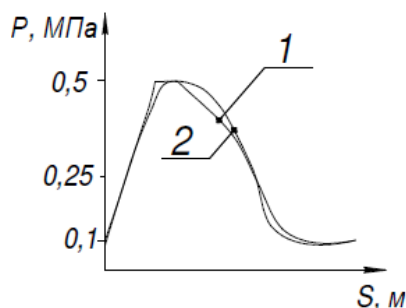


Рис. 6. Развернутая индикаторная диаграмма при времени цикла 2 с ($P_H=0,5\text{МПа}$):
1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

На рис. 6 представлены индикаторные диаграммы, полученные экспериментально и расчётным путём для давления нагнетания – 0,5 МПа. Видна удовлетворительная сходимость результатов в течение всего процесса.

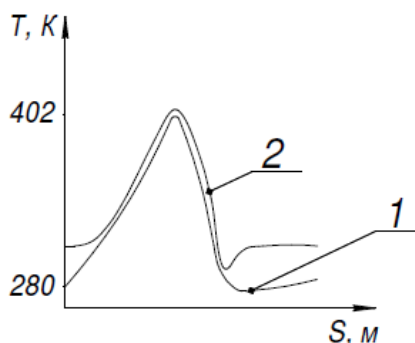


Рис. 7. Изменение мгновенной температуры газа в рабочей камере при времени цикла 2 с, без водяного охлаждения ($P_H=0,5\text{МПа}$):
1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

На рисунке 7 представлены зависимости мгновенной температуры газа в рабочей камере полученные экспериментально и расчётным путём для режима без интенсивного охлаждения. Видна удовлетворительная сходимость результатов в процессе сжатия и нагнетания и большая разница результатов экспериментальных исследований и теоретического расчёта в процессе обратного расширения и всасывания.

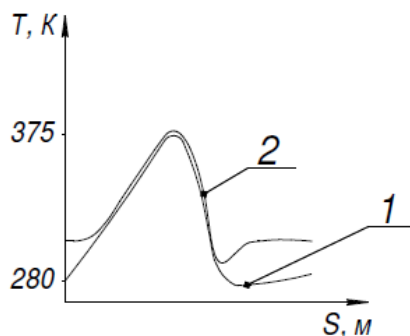


Рис. 8. Изменение мгновенной температуры газа в рабочей камере при времени цикла 2 с, с интенсивным водяным охлаждением ($P_n=0,5\text{МПа}$):
1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

На рис. 8 представлены зависимости мгновенной температуры газа в рабочей камере, полученные экспериментально и расчётным путём для режима с интенсивным охлаждением. Видны удовлетворительная сходимость результатов в процессе сжатия и нагнетания и большая разница результатов экспериментальных исследований и теоретического расчёта в процессе обратного расширения и всасывания.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 – 8 представлены экспериментальные и теоретические зависимости изменения температуры газа в цилиндре для режима с интенсивным охлаждением и без охлаждения ступени для давления нагнетания 0,3 и 0,5 МПа и времени рабочего цикла – 2 с, а также индикаторные диаграммы. Видно, что одной из проблем данных ступеней являются утечки вследствие длительности цикла – отсутствует выраженная горизонтальная «площадка» в процессе нагнетания. Разница в результатах по мгновенной температуре газа для теоретической и экспериментальной кривой составляет не более 7%, для мгновенного давления не более 2%. Уменьшение температуры газа при режиме интенсивного охлаждения по сравнению с неохлаждаемой ступенью составляет 20 – 30К. Что естественно положительно сказывается как на теплонпряжённом состоянии деталей, формирующих рабочую камеру, так и на возможности применения сжатого газа без дополнительного охлаждения потребителем.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты подтверждают теоретически полученные данные по перспективному применению тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней. Особенно ценные результаты по температуре сжимаемого газа, учитывая, что при адиабатном сжатии температура воздуха составила бы 408 и 472 К при данных условиях проведения эксперимента для давлений нагнетания 0,3 и 0,5 МПа соответственно, то полученные выигрыши по температуре составляют 65–90К.

Проведённые работы позволят в дальнейшем применять данное оборудование как на существующем стенде, так и на ряде других экспериментальных стендов, проводить лабораторные работы с использованием разработанных программ и методик испытаний.

Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки проводятся при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57715X0203

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yusha V. L., Dengin V. G., Karagusov V. I., Busarov S. S. Theoretical analysis of the working process of the superlow rotary low expense piston compressor with the increased piston stroke // 8th International Conference on Compressors and Coolants: book of abstracts. Papiernicka, Slovakia, 2013. P. 22.

2. Yusha V. L., Dengin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Gromov A. Yu. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE-2015. P. 264–269. doi:10.1016/j.proeng.2015.07.333.
3. Plastinin P., Fedorenko S. Simulation of Transient Gas-Temperatures in Cylinders of Reciprocating Compressors Using Identification Techniques With a Mathematical Model // International Compressor Engineering Conference, 1978. P. 295. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/295>.
4. Chrustalev B. S., Zdalinsky V. B., Bulanov V. P. Mathematical Model of Reciprocating Compressor With One or Several Stages for the Real Gases // International Compressor Engineering Conference, 1996. P. 1108. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1108>
5. Юша В. Л., Бусаров С. С., Криницкий В. И. Исследование процессов теплопередачи в ступени поршневого компрессора при симметричном температурном поле // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2007. № 6. С. 59–66.
6. Luszczycki M., Cyklis P., Zelasko J. Developed Mathematical Model of the Self-Acting Valves of the Reciprocating Compressor and Its Application for Tongue Valves // International Compressor Engineering Conference, 1992. P. 918. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/918>
7. Perevozchikov M. M., Pirumov I. B., Chrustalyov B. S., Ignatiev K. S., Taha A. Low Flow Displacement Compressor: Thermodynamical Process Analysis // International Compressor Engineering Conference, 1992. P. 937. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/937>
8. Юша В. Л., Карагузов В. И., Бусаров С. С. Моделирование рабочих процессов тихоходных длинноходных поршневых компрессоров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 3. С. 21–24.
9. Bland J.Martin, Douglas G. Altman. Statistics notes: measurement error. *Bmj* 313.7059. 1996. 744 p.
10. Cochran W. G. Errors of Measurement in Statistic // *Technometrics*. 1968. Vol.10, no. 4. P. 637–666. URL: <http://www.jstor.org/stable/1267450>
11. Krstev I., Helwig A., Müller G. [et al.] Detection of random vapour concentrations using an integrating diamond gas sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014. Vol.195. P. 603.
12. Гендин Г. С. Все о резисторах: справ. изд. М., 2000. 192 с.
13. Дубровский В. В. Резисторы: справ. М., 1991. 528 с.

УДК 621.51

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА ОРГАНИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
В СИСТЕМЕ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ МОБИЛЬНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ
УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ТИХОХОДНОГО ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

В. Л. Юша, Г. И. Чернов, А. М. Калашников
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация – В статье рассмотрено моделирование процессов нагрева органического топлива в системе рекуперации тепловых потерь мобильной компрессорной установки. Моделирование процессов нагрева жидкого топлива, его кипения и перегрева пара проводилось в среде ANSYS. Результаты моделирования были сравнены с известными инженерными методиками, что показало адекватность рассмотренного способа моделирования.

Ключевые слова: система рекуперации тепловых потерь, мобильная компрессорная установка, моделирование, органическое топливо.

I. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, практически вся энергия, подводимая к компрессору, преобразуется в тепловую энергию и отводится в окружающую среду посредством систем охлаждения газа, смазывающей и охлаждающей жидкостей, а также коммуникаций [1, 2]. В мобильных компрессорных установках более половины энергии, подводимой к силовому агрегату (как правило – двигателю внутреннего сгорания) в результате сжигания топлива в его рабочей камере, выбрасывается в атмосферу вместе с выхлопными газами, а также через системы охлаждения масла, охлаждающей жидкости и наддувочного воздуха [3]. Особый интерес представляют тихоходные одноступенчатые компрессоры, в которых имеют место уникальные условия охлаждения рабочего газа в цилиндре [4, 5].

Пути решения этой задачи для мобильной компрессорной установки (МКУ) с существующими компрессорными агрегатами предложены в работах [6, 7]. В них проведён термодинамический анализ различных структурных схем рекуперации тепловых потерь МКУ. Однако в этих исследованиях не рассматривался такой теплоноситель, как топливо, подаваемое в силовой агрегат. Между тем известно несколько способов повышения КПД ДВС [3, 8], в том числе и увеличение температуры подаваемого в двигатель топлива, позволяющее улучшить качество распыления и повысить полноту сгорания топлива [1, 9, 10, 11]. Очевидно, что топливо может являться одним из теплоносителей системы рекуперации тепловых потерь в МКУ. При этом элементами системы рекуперации могут быть схожие по конструкции цилиндрические охлаждающие полости топливных форсунок, цилиндров ДВС и тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора. В связи с этим задача разработки методики расчёта процессов нагрева органического топлива в системах охлаждения таких узлов является актуальной.

II. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В представленной работе исследуются процессы нагрева, кипения и перегрева пара органического топлива (керосина) в каналах элементов системы рекуперации тепловых потерь мобильной компрессорной установки на базе тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора.

III. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассматривается цилиндрическая стенка с внутренним охлаждающим каналом. Такой элемент является базовым для таких источников тепловых потерь, как цилиндры, форсунки, подшипниковые узлы. В качестве топлива рассмотрен керосин.

Канал, выполненный в цилиндрической стенке, в общем случае может быть витым с переменным радиусом витка по длине навивки, как это представлено на рис. 1. Кроме того, может также варьироваться и шаг навивки.

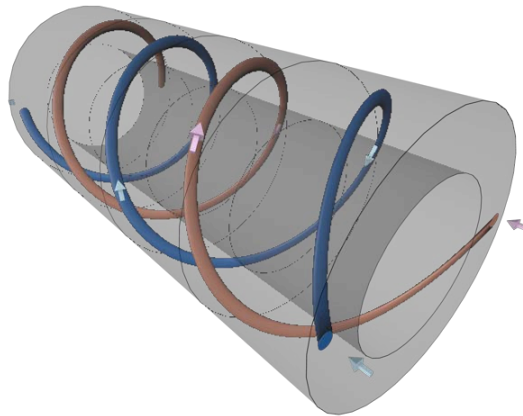


Рис. 1. Схема канала нагрева топлива

IV. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве методики расчёта нагрева керосина в среде ANSYS используется известная система уравнений конвективного теплообмена. В качестве основных приняты следующие допущения.

1. Процессы течения жидкости и теплообмена являются стационарными. Это допущение обусловлено тем, что расчёт теплогидравлических процессов осуществляется на основе сложных систем дифференциальных уравнений, нестационарность же процесса приводит к резкому усложнению системы уравнений, что усложняет получение решения.

2. Температура греющей движущийся поток стенки остаётся постоянной. Это допущение вытекает из первого допущения.

3. В потоке жидкости отсутствуют внутренние источники тепла.

В качестве основных расчётных уравнений, используемых при анализе течения, используются следующие:

- уравнение неразрывности, выражающее закон сохранения массы;
- уравнения Навье – Стокса, выражающие закон изменения импульса, на основе которого находится распределение поля скоростей в области движения потока;
- уравнение энергии, выражающее закон сохранения энергии, на основе которого строится распределение температурного поля в области движения жидкости;

– уравнение Ньютона – Рихмана, позволяющее определить тепловой поток, подводимый к движущейся среде со стороны греющей стенки.

Представленные выше уравнения образуют систему, которая описывает нагрев движущейся однофазной среды, когда в канале движется жидкость или газ. При кипении жидкости составляется система из двух подсистем. Одна подсистема описывает движение жидкости, другая подсистема – находящегося в состоянии равновесия с жидкостью пара. Связь между этими подсистемами осуществляется с помощью следующих уравнений, описывающих взаимодействие фаз на границе их раздела.

Уравнение, описывающее механическое равновесие через равенство касательных напряжений со стороны жидкости и пара на границе раздела фаз [12]:

$$\mu' \cdot \left(\frac{\partial V'}{\partial n} \right)_{\text{гр}} = \mu'' \cdot \left(\frac{\partial V''}{\partial n} \right)_{\text{гр}}, \quad (1)$$

где μ' – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы;

V' – касательная к границе раздела фаз составляющая скорости жидкой фазы;

μ'' – коэффициент динамической вязкости паровой фазы;

V'' – касательная к границе раздела фаз составляющая скорости паровой фазы;

n – координата, нормально направленная к границе раздела фаз.

Уравнение, характеризующее массообмен, связанный с переходом вещества из одной фазы в другую на границе раздела фаз:

$$(\rho' \cdot V'_n)_{\text{гр}} = (\rho'' \cdot V''_n)_{\text{гр}}, \quad (2)$$

где ρ' – плотность жидкой фазы, кг/м³;

V'_n – нормальная к границе раздела фаз составляющая скорости жидкой фазы;

ρ'' – плотность паровой фазы, кг/м³;

V''_n – нормальная к границе раздела фаз составляющая скорости паровой фазы.

Уравнение, описывающее тепловой баланс при теплообмене между жидкой и паровой фазами на границе раздела фаз:

$$-\lambda' \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{\text{гр}} = r \cdot \rho'' \cdot V''_n, \quad (3)$$

где λ' – коэффициент теплопередачи жидкой фазы;

r – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Левая часть этого уравнения определяет плотность теплового потока, подводимого (отводимого) к границе раздела фаз со стороны жидкой фазы. Правая часть этого уравнения описывает плотность теплового потока, отводимого (подводимого) от границы раздела фаз со стороны паровой фазы.

В указанные выше уравнения неразрывности, изменения импульса, энергии, теплоотдачи и Ньютона – Рихмана входят теплофизические свойства среды, которые в общем случае зависят от температуры.

Уравнения, определяющие зависимость свойств движущейся среды от температуры при представлении в аналитическом виде достаточно сложны, поэтому эти зависимости представляют в виде таблиц, которые вводятся в библиотеку свойств веществ специальных программных комплексов, например ANSYS CFX.

Построенная система дифференциальных уравнений описывает все возможные случаи теплоотдачи при движении потока в канале. Для выделения из бесконечного числа возможных решений единственного нужного систему уравнений необходимо дополнить условиями однозначности, которые делятся на условия геометрической однозначности, физической однозначности и граничные условия.

К условиям геометрической однозначности относится то, что канал, по которому движется поток, рассматривался с двумя видами поперечного сечения (круглым и треугольным), причём в основе треугольного сечения лежит равносторонний треугольник. В обоих случаях площадь поперечного сечения принималась одной и той же и равной 176 мм². Это соответствует диаметру канала 15 мм и стороне треугольника 20,2 мм.

К физическим условиям относится задание зависимостей свойств движущейся среды (керосина) от температуры в виде таблиц, которые вводятся в библиотеку свойств веществ ANSYS CFX.

Граничными условиями для расчёта теплоотдачи является задание температуры жидкого керосина на входе канала на уровне 20°C , а также задание скорости жидкого керосина на входе в канал в виде набора значений 0,1; 0,5; 1,0 м/с. При расчёте режимов нагрева жидкого керосина, его выкипания и нагрева паров керосина, массовый расход принимался постоянным. В граничные условия входило задание температуры боковой греющей стенки канала в виде набора нескольких значений, который менялся при изменении режима нагрева потока. Давление на входе потока в канал задавалось произвольным образом, т.к. интерес представляет не абсолютное значение давления, а его перепад на рассматриваемом участке нагрева.

V. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА

Расчёт указанной системы уравнений с описанными условиями однозначности был произведён в среде ANSYS с привлечением приложения CFX. Построение геометрии моделей канала производилось в модуле Geometry, построение расчётной сетки конечных элементов – в CFX – Mesh, задание граничных условий и параметров расчёта – в CFX – Pre, решение – в CFX – Solve, визуализация и анализ результатов в CFX – Post. Единицы измерения всех величин соответствовали СИ.

Пример результатов расчёта нагрева керосина до начала кипения для частного случая при скорости керосина $V=0,5\text{ м/с}$ и температуре стенки $t_{\text{ст}}=2000^{\circ}\text{C}$ приведён на рис. 2, 3 и 4. Расчётные зависимости длины канала нагрева керосина до состояния кипения от скорости керосина и от температуры греющей стенки для различных конфигураций поперечного сечения канала представлены в табл. 1.

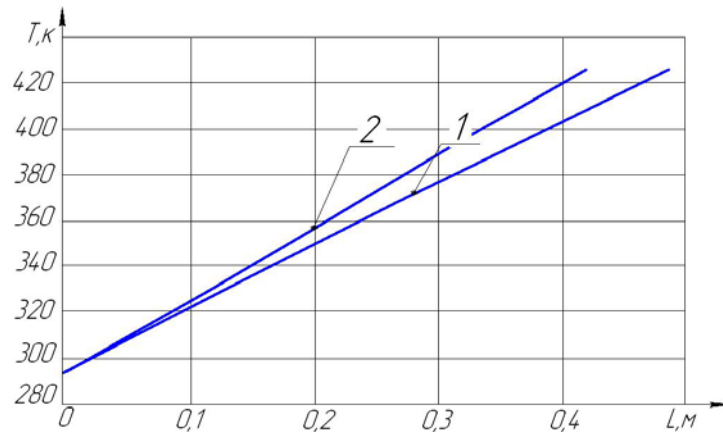


Рис. 2. Изменение температуры потока по длине канала при скорости керосина 0,5 м/с и температуре стенки $t_{\text{ст}}=2000^{\circ}\text{C}$: линия 1 – канал с круглым поперечным сечением; линия 2 – канал с треугольным поперечным сечением

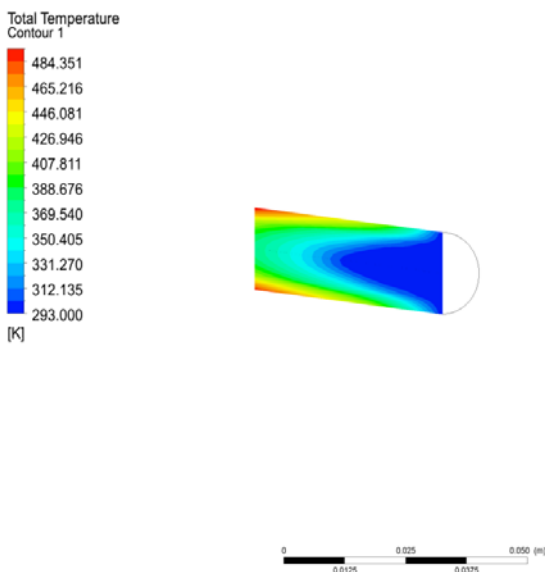


Рис. 3. Распределение температуры в продольной плоскости, проходящей через ось симметрии круглого сечения ($V=0,5\text{ м/с}$, $t_{\text{ст}}=2000^{\circ}\text{C}$)

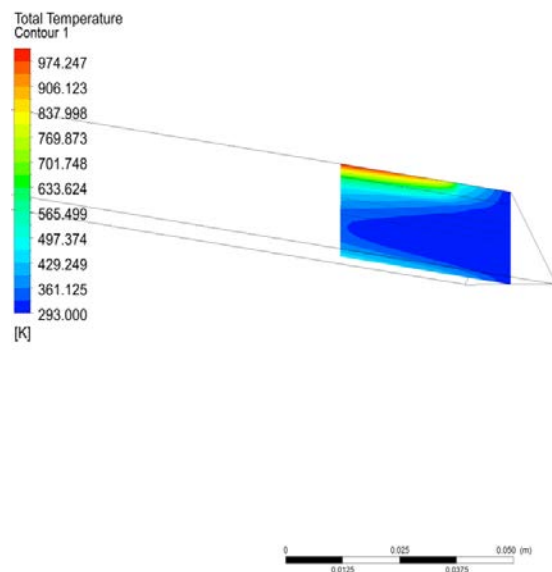


Рис. 4. Распределение температуры в продольной плоскости, проходящей через ось симметрии треугольного сечения ($V=0,5\text{ м/с}$, $t_{\text{ст}}=2000^{\circ}\text{C}$)

ТАБЛИЦА 1

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ УЧАСТКА НАГРЕВА ЖИДКОГО КЕРОСИНА
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРЕЮЩЕЙ СТЕНКИ И СКОРОСТИ ПОТОКА

Температура стенки T , °С	Скорость V , м/с	Длина канала L , мм	
		Круглое сечение	Треугольное сечение
500	0,1	783	550
	0,5	2205	1711
	1,0	2780	2317
1000	0,1	350	196
	0,5	991	735
	1,0	1260	1013
1500	0,1	224	108
	0,5	640	471
	1,0	820	661
2000	0,1	165	69
	0,5	474	319
	1,0	610	456

Особенностью кипения керосина является то, что он кипит на интервале температур от 150 до 280°С. Это обусловлено тем обстоятельством, что керосин является смесью углеводородов. В предельном случае его можно рассматривать как бинарную смесь, в которой 150°С является температурой кипения низкокипящего компонента, а 280°С – температурой кипения высококипящего компонента. При расчёте кипения керосина рассматривалось его движение в каналах также двух типов сечений – в канале с круглым поперечным сечением и в канале, поперечным сечением которого является правильный треугольник. При этом температура греющей стенки принимала значения 800; 1500; 2000°С. Скорость движения жидкой фазы керосина на входе в канал принималась равной значениям 0,1; 0,5; 1 м/с.

На основании расчёта строились зависимости изменения по длине канала температуры жидкой фазы и объёмной доли жидкой фазы).

Результаты расчёта кипения керосина представлены в табл. 1, пример результатов расчёта для частного случая при скорости керосина $V=0,5$ м/с и температуре стенки $t_{ст}=2000$ °С приведён на рис. 5 - 10.

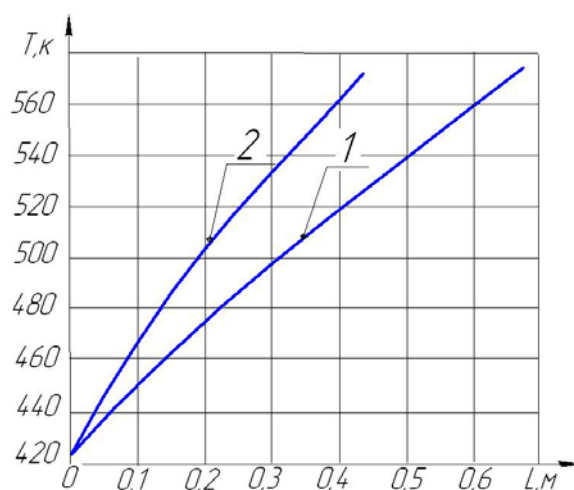


Рис. 5. Изменение температуры жидкой фазы по длине канала при скорости керосина 0,5 м/с и температуре стенки 2000°С:
кривая 1 – канал с круглым поперечным сечением;
кривая 2 – канал с треугольным поперечным сечением

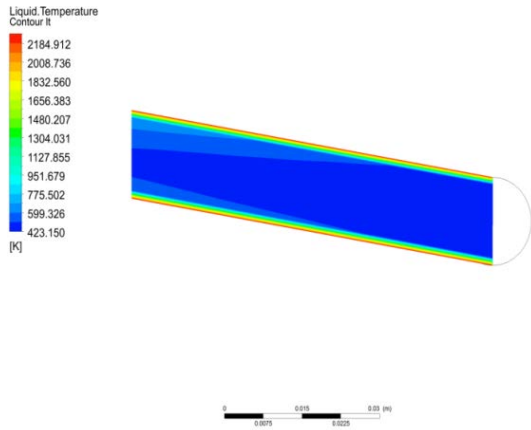


Рис. 6. Распределение температуры жидкой фазы потока в продольной плоскости, проходящей через ось симметрии круглого сечения ($V = 0,5$ м/с, $t_{ст} = 2000$ С)

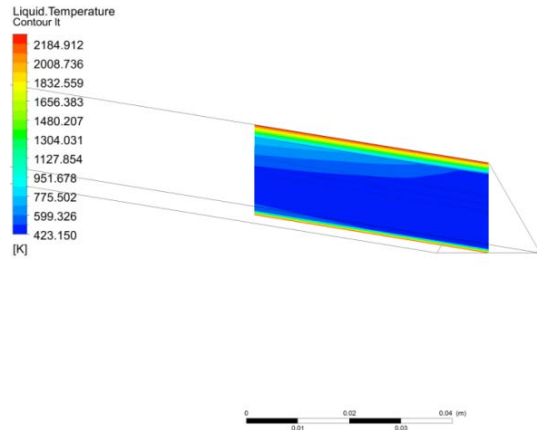


Рис. 7. Распределение температуры жидкой фазы потока в продольной плоскости, проходящей через ось симметрии треугольного сечения ($V = 0,5$ м/с, $t_{ст} = 2000$ С)

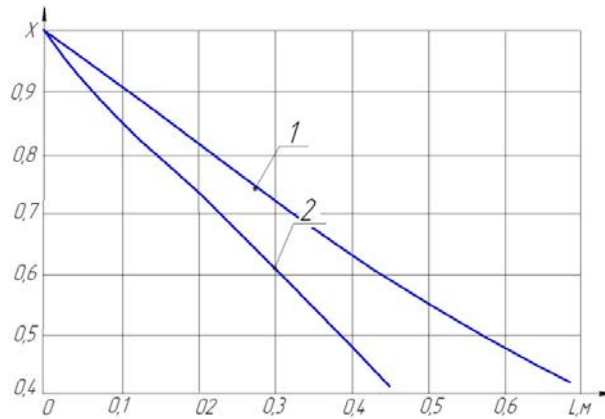


Рис. 8. Изменение объёмной доли жидкой фазы по длине канала при скорости керосина 0,5 м/с и температуре стенки 2000°С: (кривая 1 – канал с круглым поперечным сечением; кривая 2 – канал с треугольным поперечным сечением)

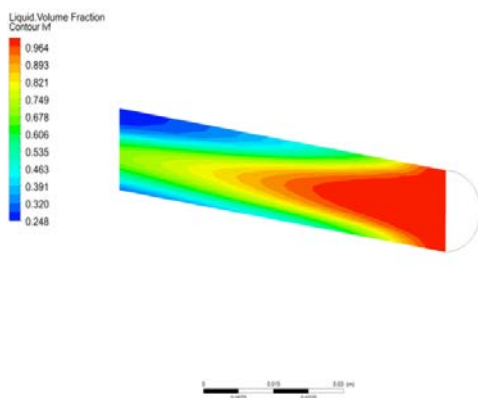


Рис. 9. Распределение объёмной доли жидкой фазы потока в продольной плоскости, проходящей через ось симметрии круглого сечения ($V = 0,5$ м/с, $t_{ст} = 2000$ С)

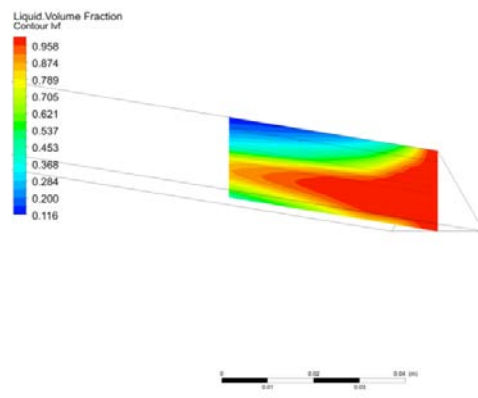


Рис. 10. Распределение объёмной доли жидкой фазы потока в продольной плоскости, проходящей через ось симметрии треугольного сечения ($V = 0,5$ м/с, $t_{ст} = 2000$ С)

ТАБЛИЦА 2

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ УЧАСТКА ВЫКИПАНИЯ КЕРОСИНА ОТ СКОРОСТИ ПОТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ ГРЕЮЩЕЙ СТЕНКИ

Температура стенки, °С	Скорость V, м/с	Длина канала L, мм	
		Круглое сечение	Треугольное сечение
800	0,1	855	496
	0,5	1860	1550
	1,0	2445	1890
1500	0,1	377	130
	0,5	938	660
	1,0	1165	830
2000	0,1	267	83
	0,5	680	442
	1,0	840	580

После полного выкипания керосина на интервале температур 280 – 300 °С при его дальнейшем нагреве происходит нагрев паров. Нагрев продолжается до достижения температуры 430 – 450 °С, при которой начинается термическое разложение паров керосина на более лёгкие углеводородные фракции [13]. Как при нагреве жидкого керосина и его выкипании, так и при нагреве паров керосина рассматривалось его движение в каналах двух типов сечений – в канале с круглым поперечным сечением и в канале, поперечным сечением которого является правильный треугольник. При этом температура греющей стенки принимала значения 1000; 1500; 2000 °С. Скорость движения жидкого керосина на входе в канал принималась равной значениям – 11; 55; 110 м/с. Это связано с понижением плотности керосина при его переходе в паровую фазу, а также сохранением массового расхода, соответствующего скоростям при движении керосина в жидкой фазе – 0,1; 0,5; 1 м/с.

Пример результатов расчёта нагрева паров керосина до начала термического крекинга при температуре греющей стенки 2000°С и скорости потока 55 м/с представлены на рисунках 11, 12 и 13. Расчётные зависимости длины канала нагрева паров керосина до начала процесса термического крекинга от скорости керосина и от температуры греющей стенки для различных конфигураций поперечного сечения канала представлены в табл. 3.

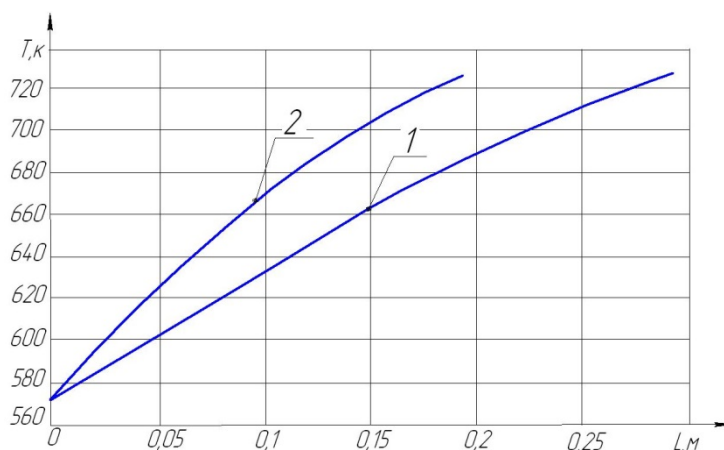


Рис. 11. Изменение температуры паровой фазы по длине канала при скорости керосина 55 м/с и температуре стенки 2000 °С:
 кривая 1 – канал с круглым поперечным сечением;
 кривая 2 – канал с треугольным поперечным сечением

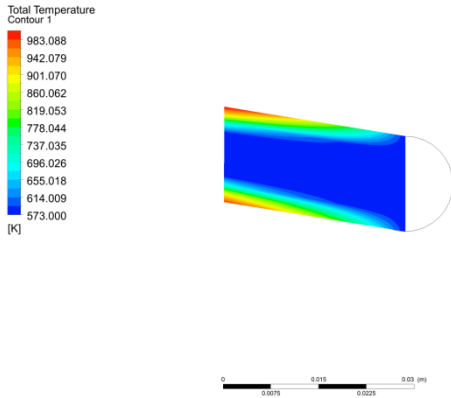


Рисунок 12 – Распределение температуры паровой фазы потока в продольной плоскости, проходящей через ось симметрии круглого сечения ($V = 55$ м/с, $t_{ст} = 2000$ °С)

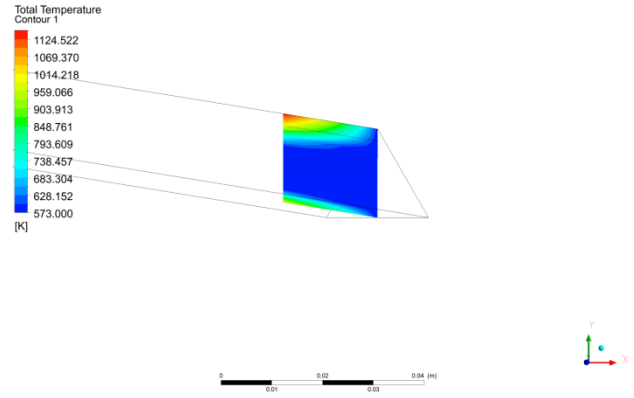


Рисунок 13 – Распределение температуры паровой фазы потока в продольной плоскости, проходящей через ось симметрии треугольного сечения ($V = 55$ м/с, $t_{ст} = 2000$ °С)

ТАБЛИЦА 3

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ УЧАСТКА НАГРЕВА ПАРОВ КЕРОСИНА ДО НАЧАЛА ЕГО ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ И СКОРОСТИ ПОТОКА

Температура стенки T , °С	Скорость V , м/с	Длина канала L , мм	
		Круглое сечение	Треугольное сечение
1000	0,1	492	373
	0,5	632	493
	1,0	699	550
1500	0,1	298	198
	0,5	387	266
	1,0	424	298
2000	0,1	208	135
	0,5	277	181
	1,0	308	203

VI. ВЫВОДЫ

Сравнение полученных интегральных результатов расчёта в среде ANSYS с результатами расчёта, полученными на основе стандартных инженерных методик [14], показало их удовлетворительную сходимость с погрешностью в пределах 20%. Подтверждением адекватности расчёта процесса кипения керосина является удовлетворительное совпадение температурных границ интервала процесса кипения (150 и 280°С) с расчётными границами интервала изменения объёмной доли кипящего керосина (1 и 0,4). Кроме того, анализ расчётов показывает, что длина участка нагрева, приводящего к началу кипения керосина, в канале с круглым поперечным сечением больше, чем в канале с треугольным поперечным сечением. Это обусловлено большим периметром треугольного сечения. Увеличение скорости потока приводит к увеличению длины участка нагрева, что является качественной верификацией результатов расчёта. Всё это показывает, что представленная в статье методика, разработанная на базе пакета ANSYS, применима для расчёта нагрева топлива в каналах сложной конфигурации, которые могут быть использованы в системе рекуперации тепловых потерь в МКУ с различными типами компрессорного оборудования. Полученные предварительные результаты позволяют предположить возможность эффективного совмещения системы рекуперации МКУ с системой топливоподготовки, в том числе с возможностью термического крекинга топлива.

Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки проводятся при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57715X0203

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архаров А. М. [и др.] Теплотехника. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 712 с.
2. Юша В. Л. Системы охлаждения и газораспределения объёмных компрессоров. Новосибирск: Наука, 2006. 236 с.
3. Луканин В. Н. [и др.] Двигатели внутреннего сгорания: теория рабочих процессов. М.: Высшая школа, 2007. 479 с.
4. Yusha V. L., Dengin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Gromov A. Yu. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE-2015. P. 264–269.
5. Юша В. Л., Карагусов В. И., Бусаров С. С. Моделирование рабочих процессов тихоходных длинноходных поршневых компрессоров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 3. С. 21–24.
6. Yusha, V., Chernov G. Effectiveness analysis of using the Rankine cycle and cycle of refrigeration machine for recuperation of heat losses in mobile compressor unite // 8th International Conference on Compressors and Coolants. Papiernička, Slovakia, 2013. P. 45.
7. Юша В. Л., Чернов Г. И. Термодинамический анализ эффективности компрессорных установок с рекуперацией тепловых потерь: моногр. Омск: ОмГТУ, 2014. 104 с.
8. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учеб. для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.
9. Марков В. А., Девянин С. Н., Мальчук В. И. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 360 с.
10. Dent J. C. Basis for the comparison of various experimental methods for study spray penetration – SAE. paper 710571. 1971. 18 p.
11. Hiroysu H., Arai M. Structures of fuei spray in diesel engines penetration – SAE paper. 900475. 1990. 14 p.
12. Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1986. 448 с.
13. Михайлов А. М. Паровая конверсия углеводородов как метод химической регенерации тепла // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Секция: Энергетика. Электротехника. 2013. № 3(178). С. 95–100.
14. Григорьев В. А., Крохин Ю. И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.

Для заметок

Для заметок