

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРАВИТЕЛЬСТВО ОМСКОЙ ОБЛАСТИ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СО РАН

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ИНСТИТУТ КАТАЛИЗА ИМ. Г. К. БОРЕСКОВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ЦЕНТР НОВЫХ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ИК СО РАН

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ ИМ. С. Л. СОБОЛЕВА СО РАН,
ОМСКИЙ ФИЛИАЛ

ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Материалы

VII Международной научно-технической конференции

(Россия, Омск, 16–17 мая 2023 года)

Научное текстовое электронное издание
локального распространения

Омск
Издательство ОмГТУ
2023

УДК 621.01
ББК 34.4
П78

Научный редактор – *Ю. А. Бурьян*, д-р техн. наук, проф.,
зав. каф. «Основы теории механики и автоматического управления» ОмГТУ

Редакционная коллегия:

Е. Г. Андреева, д-р техн. наук; *А. В. Бубнов*, д-р техн. наук;

Е. Н. Еремин, д-р техн. наук; *Л. Г. Варено*, д-р техн. наук;

А. Г. Козлов, д-р техн. наук; *К. Л. Панчук*, д-р техн. наук;

А. Н. Шевляков, д-р физ.-мат. наук; *А. И. Задорин*, д-р физ.-мат. наук

Проблемы машиноведения : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. (Россия, Омск, 16–17 мая 2023 г.) / Минобрнауки России, Ом. гос. техн. ун-т [и др.] ; науч. ред. Ю. А. Бурьян. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2023. – 1 CD-ROM (4,67 Мб). – Систем. требования: процессор с частотой 800 МГц и выше ; 128 Мб RAM и более ; свободное место на жестком диске 300 Мб и более ; Linux / Windows XP и выше ; MacOS X 10.4 и выше ; CD/DVD-ROM-дисковод ; ПО для просмотра pdf- и mp4-файлов. – Загл. с титул. экрана. – ISBN 978-5-8149-3683-7.

Материалы конференции посвящены обобщению достижений в области машиноведения.

Издание предназначено для специалистов в области машиноведения, аспирантов и студентов.

Ответственность за содержание материалов несут авторы

Издается в авторской редакции

*Электронный оригинал-макет издания подготовлен
в отделе НИД ОмГТУ*

*Для дизайна этикетки использованы материалы
из открытых интернет-источников*

Пленарный доклад

УДК 622.7

Использование золы угольных ТЭС. Как минусы превратить в плюсы Use of ash from coal thermal power plants. How to turn negatives into positives

П. А. Батраков, К. О Почекуева
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

P. A. Batrakov, K. O Pochekueva
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье рассмотрены экологические проблемы, связанные с образованием золоотвалов на угольных ТЭС и предложены пути их решения. Приведены подробные сведения о содержании элементов-примесей в золе Экибастузского бассейна и о наличии в них ценных компонентов, которые могут вызывать интерес на сырьевом рынке. Проведен литературно-патентный обзор методов выделения элементов из золошлаковых отходов. Определенно, что наиболее актуальной задачей является выделение железосодержащих продуктов и других металлов.

Ключевые слова: зола, Экибастузский каменноугольный бассейн, железосодержащие продукты, извлечение

Abstract. The article considers environmental problems associated with the formation of ash dumps at coal thermal power plants and suggests ways to solve them. Detailed information is given on the content of impurity elements in the ash of the Ekibastuz basin and on the presence of valuable components in them that may be of interest in the commodity market. A literature and patent review of methods for separating elements from ash and slag wastes has been carried out. Definitely, the most urgent task is the isolation of iron-containing products and other metals.

Keywords: ash, Ekibastuz coal basin, iron-containing products, extraction

I. Введение

Энергетика Омской области является важным сектором экономики региона, обеспечивающая горожан и производство, расположенное в городе теплом и электроэнергией. На данный момент в Омске эксплуатируются три теплоэлектроцентрали (ТЭЦ-3, ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5). И только для ТЭЦ-3 основным топливом является природный газ, а для ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5, которая является крупнейшим энергообъектом в Омске, используют в качестве основного топлива Экибастузский уголь. Уголь, как энергетическое топливо имеет большое количество, как плюсов, так и минусов, но одним из самых значимых недостатков его является высокая зольность. Существует много различных способов вылавливать золу из дымовых газов, но остается другая проблема, утилизации после улавливания. На сегодняшний день это отправка на золоотвалы, которые представляют собой специальные гидронакопители.

На золошлаковых полигонах постоянно происходит испарение воды с образованием сухих зон с пылевидными частицами золошлаковых отходов, уносимых ветром, а так же инфильтрация эмульсии (смеси воды и золы). В результате инфильтрации эмульсии в подземные воды и водоемы поступают растворенные формы токсичных компонентов расположенные вне золошлаковых полигонов. Вредные вещества, таким образом, проникают в воздух, воду и загрязняют приземный слой атмосферы, почвы, подземные и поверхностные воды на территориях, расположенных на расстоянии нескольких километров. Распространяясь далее по различным пищевым цепочкам, токсичные вещества, содержащиеся в золошлаковых отходах, приводят к деградации биосистемы и негативно влияют на здоровье человека [1].

Одним из основных и наиболее агрессивных элементов являются тяжелые металлы. Зола, выдуваемая из золошлаковых отвалов, способна создавать в почве в несколько раз большие концентрации загрязняющих веществ, чем в результате выбросов из труб. Именно почва находится в центре трансграничного переноса и процессов попадания в неё тяжелых металлов. В настоящее время на территории золошлаковых отвалов хранится у ТЭЦ № 4 площадью 400 га 30 млн. тонн, на золоотвале ТЭЦ № 5, площадью 471 га, лежат еще 50 млн. тонн золошлаковой смеси.

II. Постановка задачи

Элементный состав золы в первую очередь определяется угольным пластом, который зависит от его местоположения, глубиной залегания, но при этом немаловажным является способ добычи и переработки. Причем зольность угля и его состав не являются величинами постоянными, к примеру, по мере истощения пласта зольность топлива увеличивается.

Но для нас больший интерес вызывает не зольность угля, а зола-уноса (летучая зола) и шлак, которые образуются из золы в результате сжигания топлива. А на её состав и концентрацию элементов влияет не только месторождение, но и температура, и способ сжигания (твердое или жидкое шлакоудаление), коэффициент избытка воздуха, а так же степень размола (размер частицы угля).

Основными элементами, формирующие золу-уноса и шлак, являются макроэлементы, такие как кремний, алюминий, железо, кальций их доля обычно достигает 98-99 % от общей массы золы, которые находятся не в чистом виде, а в химической связи, в основном с кислородом в виде диоксида кремния SiO_2 , оксида алюминия Al_2O_3 и т.д. Ещё в золе присутствуют и микроэлементы, такие как стронций, барий, таллий, свинец, но доля их обычно не превышает 0,1 %.

Так же в золе встречаются органоминеральные компоненты: щелочные и щелочноземельные металлы, натрий, калий, кальций и магний, располагаются они между макро- и микрокомпонентами, встречаются и неорганические соединения, такие как кальцит, доломит и гипс [2].

Зола, как правило, состоит из минеральной и органоминеральной части. Первая часть представляет минералы, а вторая часть, которая является наименее изученной, в виде соединений с органическим веществом угля, к ним относятся соли гуминовых кислот, сложные гуматы, характеризующиеся кольцевой системой связей, а также комплексные соединения органических элементов.

Минералогический состав зольных фаз определяется соединениями неорганических компонентов угля, а также физико-химическими процессами, происходящими при его сгорании. Основное количество неорганических элементов сосредоточено в виде кварца, минералов из группы каолинитов, сидерита. В качестве примесей встречаются гидрослюда, полевошпат, карбонаты кальция и магния (арагонит, кальцит и магнезит), пирит. Содержание железа варьируется в углях, основными соединениями являются сидерит и пирит [2].

Кроме черных металлов встречаются и такие металлы, как титан, бериллий, медь, марганец и ряд некоторых других. Так, из буроугольного шлака извлекают до 40-67 % титана, 45-77 % бериллия, 70-87 % меди, 50-81 % марганца, 74-84 % мышьяка, 48-60 % ванадия и 62-83 % галлия [3].

Понимание полного химического состава золы и возможности его выделения является важной задачей, поэтому необходимо рассмотреть физико-химический состав основного топлива, используемого ТЭЦ г. Омска (Экибастузский уголь) и оценить привлекательность золы-уноса и шлака с точки зрения извлечения из них ценных компонентов.

III. Теория

Проведём оценку ценных и токсичных элементов, входящих в состав золы углей Экибастузского месторождения, а также оценку уровней накопления, закономерностей и условий распространения концентрации примесей в Экибастузском угле.

В настоящее время угольные месторождения вызывают все больший интерес, как источники полезных элементов. Это связано с высоким ростом потребления в производстве металлов, а зола может содержать большое количество промышленно значимых ценных примесей. Для этого рассмотрим подробный состав Экибастузского угля (Табл. I).

ТАБЛИЦА I
ПОДРОБНЫЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЭКИБАСТУЗСКОГО УГЛЯ

№	Наименование	Ед. измерения	Величина, средние показатели по разрезу
1	Элементарный состав по рабочей массе		
	C	%	81,0
	H	%	4,0
	N	%	1,6
	O	%	11,6
S	%	0,5-0,8	

2	Низшая теплота сгорания топлива, Q_p^H	МДж/кг	16,8
3	Максимальная влажность, W	%	10
4	Выход летучих веществ, V	%	25-29
5	Характеристика золы (t)		
	Начало деформации	°С	1176
	Размягчение	°С	1400
	Начало жидкоплавкого состояния	°С	1470
	Истинно жидкого состояния	°С	1600
6	Зольность топлива на сухую массу, A	%	43
	Состав зольного остатка:		
	SiO ₂	%	66,0
	Al ₂ O ₃	%	25,0
	Fe ₂ O ₃	%	6,0
	CaO	%	3,0
	MgO	%	0,8
	TiO ₂	%	0,8
	SO ₃	%	0,9
	NA ₂ O+K ₂ O	%	0,8
	P ₂ O ₅	%	0,5
7	Класс радиационной безопасности		1,1

Экибастузский уголь уникален своим мощным залеганием пласта, крупнейшими запасами энергетических углей, а также кроме основных элементов, представленных в таблице 1, содержанием редкоземельных элементов, глиноземов, таких как Sc, Y, Cu, Zn, Au, Ag, Zr, Ti и др.

Комплексное производство и добыча полезных продуктов с золоотвалов – это система технико-экономических и других методов, а так же средств, которые обеспечивают комплексную разведку, оценку и переработку золы для получения оптимально-качественного уровня основных и попутных компонентов.

Потребность в цветных и редкоземельных металлах в мире растёт и поэтому вопросы о поиске их, и возможность получать их из золы является перспективной задачей.

IV. Способы извлечения элементов из золошлаковых отходов

С учетом выше сказанного, можно говорить о двух наиболее важных группах элементов, из которых состоит зола это микро- и макроэлементы. Наиболее распространённым способом выделения микроэлементов является выщелачивание, которое подбирается в зависимости от качественного состава золы, набора выделяемых элементов и выбора реакционной среды, определяемых температурой и временным режимом обработки [4]. Анализ литературных данных о методах извлечения микроэлементов позволяет разделить на ряд групп [3]:

– кислотный метод. Извлечение основных и амфотерных микроэлементов из сухой смеси с помощью сильных растворов минеральных кислот (H₂SO₄, HCl, HNO₃) или уксусной кислотой;

– щелочной метод. Применение щелочных растворов (NaOH, Na₂CO₃, NaHCO₃, NH₄OH, Ca(OH)₂) для извлечения кислых и амфотерных микроэлементов;

– биотехнологический. Выщелачивание металлов за счёт использования бактерий.

Кроме того, в последнее время все большее развитие получают фторидные способы переработки минерального сырья. Но данный способ требует для полного извлечения компонентов из золы создания оптимальных технологических условий (в большинстве случаев сложно контролируемых или дорогостоящие), которые определяются варьированием различных физико-химических свойств фторидов и фторметаллатов аммония.

Что касается макроэлементов, то наиболее эффективным способом является сепарация, которая позволяет увеличить выделение этих элементов из твердого остатка. Наиболее распространённым является метод магнитной сепарации для отделения металлосодержащих фракций от золы.

Всё чаще применяется не один из методов, а комплекс переработки золы-уноса и шлака. К примеру, комплексная установка включает переработку сернокислотного выщелачивание редкоземельных и радиоактивных металлов с последующей щелочной экстракцией галлия и аморфного оксида кремния и магнитной сепарацией.

V. Извлечение алюминия из золы-уноса

Извлечение алюминия и оксидов алюминия связано с процессами агломерации, которые включают высокотемпературную реакцию летучей золы с порошкообразными спекающими агентами с образованием растворимых соединений оксида алюминия. Затем агломерат выщелачивают (для отделения алюминия), а полученный раствор обрабатывают для получения глинозема высокой чистоты.

В процессе агломерации зола реагирует с известью (добавленной в виде известняка) при повышенной температуре ($> 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$) с образованием алюмината кальция (растворимого в экстрагенте) и нерастворимого в том же растворе CaSiO_3 (силикат кальция). [5]. Извлечение глинозема из агломерата осуществляют селективным растворением глинозема, используемым как экстракция и осаждением CaSiO_3 в виде твердого остатка. Обычные экстрагенты включают воду и разбавленные щелочные растворы, такие как Na_2CO_3 и NaOH . После выщелачивания алюминий осаждается в виде $\text{Al}(\text{OH})_3$ при контакте раствора с CO_2 . Следующим этапом является прокаливание осадка для получения конечного продукта α - или γ - оксида алюминия.

Первый способ агломерации с известковой содой разработал Кайзер А. в 1902 году для отделения глинозема от кремнезема [3]. Известно, что при реакции смеси извести и соды с золой-уносом образуются растворимый алюминат натрия и нерастворимый силикат кальция. При высоких температурах (обычно $1100\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) неизбежно образование других соединений в зависимости от вида золы-уноса и условий спекания. Как и при известковой агломерации, спеченный продукт выщелачивают водой, раствором едкого натрия или карбоната натрия. Поэтому процесс агломерации с известковой содой также включает стадию очистки раствора. Полученную суспензию фильтруют и раствор обрабатывают суспензиями $\text{Ca}(\text{OH})_2$ для осаждения растворенного кремнезема при высокой температуре и давлении, который затем разлагают так же, как в процессе Байера или обрабатывают CO_2 для осаждения гидратированный оксид алюминия. $\text{Al}(\text{OH})_3$ отделяют и превращают в оксид алюминия прокаливанием.

За счёт агломерации золы-уноса с известью и содой за счёт растворения и карбонизации, степень извлечения алюминия составляет 40 %, а степень извлечения оксида алюминия Al_2O_3 достигает 91 %. Степень извлечения алюминия можно достигнуть до 90 % при создании оптимальных условий, путем разбавления щелочью и карбонизации и превращения аморфного кремнезема в продукт аморфных наночастиц, при этом процессе летучая зола смешивается и спекается с гипсом и известняком при температуре около $1000\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. Затем агломерат выщелачивают разбавленной кислотой. Твердые частицы отходов удаляют фильтрованием, а металлические остатки извлекают из фильтрата.

Тщательное отделение алюминия от кремния может быть достигнуто с помощью процесса прямого кислотного выщелачивания. Обычно для выщелачивания золы-уноса используют серную, соляную и азотную кислоты. Водная суспензия 20 % (масса/объем) летучей золы готовится с использованием 16 моль/л HNO_3 и 36 моль/л H_2SO_4 , которая растворяет не более 10 % общего количества алюминия при температуре окружающей среды в течение 72 часов [3]. Больше количество алюминия извлекается при выщелачивании с обратным холодильником в течение длительного времени и даже тогда в кислом фильтрате растворяется не более половины алюминия.

VI. Выводы и заключение

Упомянутые в статье способы извлечения полезных компонентов из золы и шлака в основном используются на уровне лабораторий и пока редко встречаются на Российских ТЭС(Ц) и котельных. По этой причине коммерциализация и развитие этой системы является одной из важнейших проблем экологии и технологии. Переработка золы в строительные материалы повысит эффективность использования топлива, что приведёт к значительному снижению затрат на отопление и выработку электроэнергии. Кроме того, выделение из золы редкоземельных и цветных металлов решит проблему нехватки материалов.

Список литературы

1. Делицын Л. М., Ежова Н. Н., Власов А. С., Сударева С. В. Золоотвалы твердотопливных тепловых электростанций как угроза экологической безопасности // Экология промышленного производства. 2012. № 4. С. 15–26.
2. Ермагамбет Б. Т., Нургалиев Н. У., Абылгазина Л. Д. [и др.]. Исследование химического состава золы углей // Наука, техника и образование. 2018. № 8 (49). С. 10–14.
3. Yermagambet B. T. [et al.]. Methods for extraction of valuable components from ash-and-slag coal wastes // News of The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series Chemistry and Technology. 2018. Vol. 6, no°. 432.

4. Михайлов Ю. Л. Физико-химические исследования процессов выщелачивания микрокомпонентов золы от сжигания углей Экибастузского бассейна: специальность 02.00.04 "Физическая химия" : диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Михайлов Юрий Леонидович. Омск, 2001. 117 с.

5. Адеева Л. Н., Борбат В. Ф. Зола ТЭЦ – перспективное сырье для промышленности // Вестник Омского университета. 2009. № 2(52). С. 141–151.

Секция. Электромеханическое, теплоэнергетическое оборудование и технологии

УДК 004.415.2

Оптимизация алгоритмов управления объектами с распределенными параметрами Optimization of object management algorithms with distributed parameters

Ш. М. Гулямов¹, Н. Ж. Хожиева², Л. Т. Маришева², Н. П. Исхакова²

¹*Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
г. Ташкент, Узбекистан*

²*Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммеда Аль-Хоразми,
г. Ташкент, Узбекистан*

Sh. M. Gulyamov¹, N. J. Xojiyeva², L. T. Marisheva², N. P. Isxakova²

¹*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan*

²*Tashkent University of Information Technology named after Muhammad Al-Khorazmi, Tashkent, Uzbekistan*

Аннотация. Предложен способ решения задачи совместной оптимизации по системным критериям качества теплофизических процессов предварительного нагрева и последующей пластической деформации металлических полуфабрикатов в производственных комплексах для обработки металлов давлением в условиях свободы выбора приемлемых начальных температурных состояний перед пластической деформацией, увязывающий эти процессы в единое целое. единая технологическая система. Возможности практического применения способа проиллюстрированы на примере технологического комплекса, предназначенного для изготовления пресс-изделий из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: технологический комплекс, обработка металлов давлением, индукционный нагрев, оптимизация соединения, критерии качества системы, оптимальное управление, метод чередования, оптимальное проектирование

Abstract. A method is proposed for solving the problem of joint optimization according to system quality criteria of thermophysical processes of preheating and subsequent plastic deformation of metal semi-finished products in production complexes for metal forming under conditions of freedom of choice of acceptable initial temperature states before plastic deformation, linking these processes into a single technological system. The possibilities of practical application of the method are illustrated by the example of a technological complex designed for the manufacture of press products from aluminum alloys.

Keywords: technological complex, metal forming, induction heating, joint optimization, system quality criteria, optimal control, alternance method, optimal design

I. Introduction

In the conditions of the further development of the leading industry, there is an increase in the specific weight of heat and mass transfer processes, accompanied by chemically converted interacting times, a significant increase in their energy and material consumption, it is necessary to impoverish the achievement of the maximum possible mechanical and economic performance of technological equipment. This requires the development of methods for improving its design characteristics to the appropriate organization of operating modes that are optimal according to the accepted efficiency criteria.

Serious difficulties that arise along this path are determined by the high level of complexity of most critical energy-technological processes, the state functions of which, first of all, are characterized by a pronounced uneven distribution within the spatial area occupied by the object [112].

This problem can be solved in its main aspects on the basis of modern theory and techniques of optimal control of systems with distributed parameters (PSC). The PSA includes a wide range of managed facilities, covering both traditional and the latest technologies in various fields of technology. The practical implementation of such technologies with the required quality indicators is impossible without the construction of appropriate automatic control algorithms, which was the main stimulus for the creation of the theory and methods of SRP control. The problems of optimal control of SRP turn out to be qualitatively more complex compared to similar problems of control of systems with lumped parameters in view of a number of fundamental features of these systems associated with the spatial distribution of controlled variables [3].

Starting with the fundamental works of A.G. Butkovsky, to date, a number of fundamental results have been obtained in the theory of SRP control. Here we can, first of all, note the works of G.L. Degtyareva, A.I. Egorova, Yu.V. Egorova, V.A. Kovalya, J.-D. Lions, K.A. Lurie, I.M. Pershina, V.I. Plotnikova, L.M. Pustynnikova, E.Ya. Rapoport, T.K. Sirazetdinova, A.V. Fursikova, F.L. Chernousko and many other domestic and foreign scientists.

II. Problem statement

In recent years, interest in the problem of optimal control of SRP has increased significantly. However, the general theory of managing objects with distributed parameters is forced to operate with abstract theoretical schemes that do not fit practical requirements and many fundamental features of specific applied problems. This leads to an abstraction from a number of factors that are fundamental for applied problems, the consideration of which is necessary to obtain engineering solutions that are acceptable in practice. At the same time, PSAs are characterized by an almost unlimited range of essential features, which leads to the emergence of separate control problems in relation to each class of the processes under study.

One of the central problems in the control theory of PDS in relation to a number of applied problems of independent interest remains the development of constructive methods for solving boundary value problems of optimizing PDS to transfer an object to the required final state with extreme values of the optimized quality indicators in order to construct program control algorithms and synthesis methods. closed systems with feedback. Approaches to this problem, widely used in practice, based on approximate descriptions of SRP in terms of systems with lumped parameters, are characterized by a number of significant shortcomings or are generally unacceptable.

This necessitates the development of new effective and practical methods for finding optimal control algorithms in such problems, taking into account almost always existing tolerances for deviation from the nominal point fixed in the original two-point scheme.

Thus, there is a very high demand for the problem of development, theoretical justification, construction of computational algorithms and practical application of a constructive method for the exact solution of boundary value optimization problems of TORP with a moving right end of the trajectory in the infinite-dimensional phase space of the coordinates of the system, this approach is gassed by their methods of sequential finite-dimensional parameterization of control actions and essential using the basic laws of the subject area of the processes being optimized.

In this regard, it is useful to refer to the works of processes by Yu.E. Vaeshivtseva. vertebral sequential parameterization of impact controls and by infinite optimization of the algorithm for controlling technological objects with results and parameters. At the scientific school Pleshiva Yu.E. the foundations of the theory and technique of applying an effective method for the exact solution of boundary value optimization problems of TORP with a given target set of final states are being developed and computational algorithms based on this method are being built to solve a wide range of applied problems of optimal control of energy technological processes.

III. Theory

This work expands and deepens the theoretical understanding of the general patterns of optimal processes in boundary value problems of SRP control; offers new methods for their qualitative and quantitative description, research and synthesis of appropriate optimization algorithms; establishes ways of detailing the general laws in relation to a number of applied POZ TORP, which are of independent interest.

The application of the developed methods and algorithms of optimal control to solving practical problems provides significant technical and economic advantages over standard technologies and well-known methods for optimizing TORP for all the main quality indicators of the processes being optimized.

As a basic model of TORP, the dissertation considers linear boundary value problems that allow maximum opportunities for their analytical study, obtaining fundamental results of a general nature and, at the same time, which

turn out to be quite representative for a qualitative and quantitative description of a wide range of real controlled processes. There is a possibility of extending the results obtained to the control problems of much more complex TORP models.

Managed state function $Q(x, t)$ distributed object is described depending on the spatial coordinate $x \in [x_0, x_1]$ and time t by a typical second-order space-one-dimensional equation in partial derivatives of parabolic type:

$$A_1 \frac{dQ(x, t)}{dt} = C(x) \frac{d^2 Q(x, t)}{dx^2} + B(x) \frac{dQ(x, t)}{dx} + C_1(x) Q(x, t) + u(x, t); \quad (1)$$

$$x_0 < x < x_1, 0 < t < t_k,$$

modeling, in particular, in a linear approximation a wide range of heat and mass transfer processes in heat-technological apparatuses and installations, with given initial:

$$Q(x, 0) = Q_0(x); x_0 \leq x \leq x_1 \quad (2)$$

and boundary conditions:

$$\alpha_0 Q(x_0, t) + \beta_0 \frac{dQ(x_0, t)}{dx} = u_0(t), \alpha_1 Q(x_1, t) + \beta_1 \frac{dQ(x_1, t)}{dx} = u_1(t) \quad (3)$$

distributed internal and (or) lumped boundary control actions, respectively, $u(x, t)$, $u_0(x)$, $u_1(x)$ at given constants $(A_1, \alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1)$ and in the general case of coordinate-dependent $(C(x), B(x), C_1(x))$ coefficients.

In formal studies of a general nature, it is assumed to use exact descriptions of the behavior of the controlled variable within the considered class of models, which preserve the main qualitative features of the TORP and thereby exclude the loss of the essential physical properties of the SRP associated with typical schemes of the initial discretization of the plant model equations. Approximations inevitable in a specific analysis, in particular, digital models of objects, are used only at the final stage of the numerical solution of optimization problems using already found control algorithms, i.e., the final discretization method is used.

The general statement of the boundary value problem of optimal control is formulated to describe the TORP model by an infinite system of equations in the Cauchy normal form:

$$\frac{dq}{dt} = f(q, u, t); (q(0)) = q^0, \quad (4)$$

with respect to the vector q of phase variables $q_n, n = \overline{1, \infty}$, the specific meaningful meaning of which is determined by the method used to reduce the model equations (in particular, (1)-(3)) to the form (4).

Here u is the vector of control actions $u_i(t), i = \overline{1, r}, 1 \leq r \leq \infty$, which for a wide range of applied problems are described in the class of piecewise continuous functions and associated with $u(x, t), u_0(t), u_1(t)$, in (1), (3) by the chosen reduction scheme to model (4). In real conditions, the change in time of control actions is limited to some predetermined closed area U of their allowable values:

$$u(t) \in U. \quad (5)$$

In the general case, the requirements for the final state of an object $q(t_k)$ at $t = t_k$ are formulated as conditions for its membership in a certain set S_1 infinite-dimensional phase space of variables q_n :

$$q(t_k) \in S_1. \quad (6)$$

The quality of the control process is estimated by the integral functional I with a given integrand $f_0(\cdot)$, which is assumed to be continuous in the set of arguments and continuously differentiable by phase coordinates:

$$I = \int_{t_a}^{t_k} f_0(q, u, t) dt \rightarrow \underset{u}{extr}. \quad (7)$$

Let us turn to the basic problem of optimal softwareobject management(4).

A task. Among the admissible control actions (5) that transfer the control object (4) from a given initial state to the desired final state, according to (6), it is required to find such an optimal control $u^{opt}(t)$ and the corresponding phase trajectory $q^{opt}(t)$, for which the criterion optimality(7) takes on an extreme value.

Application of the standard procedure of Pontryagin's maximum principle, extended to Problem 1, leads to a very complicated infinite-dimensional boundary value problem of optimal control. For a given edge OCD, there formally exists a solution for the desired control actions, represented in the form of essentially nonlinear parametric dependencies on the initial values $\psi_n(0)$, $n = 1, 2, \dots$ an infinite number of conjugate variables $\psi_n(t)$. The difficulties of actually calculating such solutions become fundamental in the classical two-point formulation with the degeneration of the set S_1 into (6) a given point $q(t_k) = q^{(1)}$, because due to the lack of information about the values $\psi_n(0)$, $n = 1, 2, \dots$ the original FOC is reduced to a practically unsolvable with respect to $\psi(0)$ infinite system of equalities given values $q_n^{(1)}$ final values of phase coordinates $q_n(t_k)$:

$$q_n(\psi(0)) = q_n^{(1)}, n = 1, 2, \dots$$

Dependencies $q_n(\psi(0))$ from unknown vector $\psi(0)$ are presented explicitly after integrating the plant equations (4) with parametrized on the set $\psi(0)$ control influences.

In addition, in a number of typical requirements for a given finite spatial distribution of the state function $Q^*(x)$, the object either turns out to be uncontrollable with respect to the required final state, or the given final state is achieved in the class of technically unrealizable optimal controls. It can be shown that the methods of approximate solution of these problems, widely used in practice, implemented according to the initial discretization scheme, have a number of significant drawbacks, or even turn out to be inapplicable in the case of uncontrollability of the initial TORP model with respect to a given final state. $Q^*(x)$.

IV. Experimental results

As an effective way to overcome these difficulties, it is advisable to abandon the traditional scheme with a fixed end of the phase trajectory already at the stage of setting the problem, which is considered for the exact infinite-dimensional TORP model in the framework of the initial description of the controlled process. The classical formal two-point scheme, as a rule, does not meet the practical requirements for the final state $Q(x, t_k)$, for which in all real situations there are some non-zero tolerances for deviation from the desired distribution $Q^*(x)$. This means that, in

fact, we can restrict ourselves to setting the problem with a given target set G of final states equivalent to requirement (6)

$$Q(x, t) \in G, \quad (8)$$

each of which corresponds to the permissible value of such an error, estimated in advance by a chosen method. The actual requirements in the majority of the most typical applied problems correspond to estimates of this error in the uniform metric by the maximum value ε absolute deviation $Q(x, t)$ from $Q^*(x)$ within the spatial area occupied by the object.

With regard to the considered class of control problems TORP, for a given admissible value $\varepsilon = \varepsilon_0$ the corresponding target set automatically excludes unacceptable local deviations of the final spatial distribution of the controlled variable from the given state and is described by the following relationship:

$$\max_{x \in [x_0, x_1]} |Q(x, t_k - Q^*(x))| \leq \varepsilon_0. \quad (9)$$

In this connection expedient statement of the problem of optimization of TORP with the reachable target set given in the infinite-dimensional phase space (9). This creates potential opportunities for its exact solution in the class of technically realizable optimal control algorithms.

V. Discussion of the results

Application to the object equations (1)-(3) of finite integral transformations with respect to the spatial argument with a kernel equal to its own functions $\varphi_n(\mu_n, x)$, $n = 1, 2, \dots$, where μ_n - eigenvalues, leads to the representation of the TORP model (4) by an infinite system of linear equations with respect to the coefficients (time modes) $\overline{Q}_n(\mu_n, t)$ decomposition $Q(x, t)$ in an endless row $\varphi_n(\mu_n, x)$:

$$\frac{d\overline{Q}_n(\mu_n, t)}{dt} = \frac{1}{A_1} (-\mu_n^2 \overline{Q}_n(\mu_n, t) + \overline{u}_n(\mu_n, t) + d_{0n} u_0(t) + d_{1n} u_1(t)), \quad (10)$$

$$\overline{Q}_n(\mu_n, 0) = \overline{Q}_0(\mu_n); n = 1, 2, \dots, \infty.$$

with subsequent restoration of the controlled state function of the SRP by known modes as the sum of the series:

$$Q(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{Q}_n(\mu_n, t) \varphi_n(\mu_n, x). \quad (11)$$

Here $\overline{u}_n(\mu_n, t)$, $\overline{Q}_0(\mu_n)$ - expansion modes of the internal distributed action $u(x, t)$ and given initial distribution $Q_0(x)$ into infinite series of the form (11); d_{0n} and d_{1n} are constant coefficients. Restrictions on the Behavior of Lumped Controls $u_0(t)$ and $u_1(t)$, appearing in the boundary conditions (3), are most often represented in the simplest form with given boundaries $u_{0\min}$, $u_{0\max}$, $u_{1\min}$, $u_{1\max}$ the range of their possible change:

$$u_{0\min} \leq u_0(t) \leq u_{0\max}; u_{1\min} \leq u_1(t) \leq u_{1\max}, t > 0. \quad (12)$$

The restrictions on the internal distributed control action included directly in the plant equation (1) are formulated in a similar way:

$$u_{\min} \leq u(x, t) \leq u_{\max}, \forall t > 0; x \in [x_0, x_1] \quad (13)$$

Thus, the following constraint is imposed on modal controls:

$$u_{\min} \leq \max_{x \in [x_0, x_1]} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \overline{u}_n(\mu_n, t) \varphi_n(\mu_n, x) \right) \leq u_{\max}. \quad (14)$$

When modeling TORP by the system of equations (10), (11), the target set (9) in the infinite-dimensional phase space of variables \overline{Q}_n corresponds to the admissible region $S \mathcal{S}_1$ final states of the object in (6) of the following form:

$$S_1 = \left\{ \overline{Q}; \max_{x \in [x_0, x_1]} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \overline{Q}_n(\mu_n, t_k) \varphi_n(\mu_n, x) - Q^*(x) \right| \leq \varepsilon_0 \right\} \quad (15)$$

for a given value ε_0 uniform approximation $Q(x, t_k)$ to $Q^*(x)$ on the segment $[x_0, x_1]$ changes in the spatial variable. Integral quality functional (7) when controlling an object (10) with a given integrand f_0 vectors of control actions $w(t) = (\overline{n}_n(\mu_n, t), u_1(t), u_0(t)), n = 1, 2, \dots$ and phase variables $\overline{Q} = (\overline{Q}_n(\mu_n, t))$ can be written in the following form:

$$I = \int_0^{t_k} f_0(\overline{Q}, w, t) dt \rightarrow \min_w. \quad (16)$$

VI. Conclusions

In formal studies of a general nature, it is assumed to use exact descriptions of the behavior of the controlled variable within the considered class of models, which preserve the main qualitative features of the TORP and thereby exclude the loss of the essential physical properties of the SRP associated with typical schemes of the initial discretization of the plant model equations. Approximations inevitable in a specific analysis, in particular, digital models of objects, are used only at the final stage of the numerical solution of optimization problems using already found control algorithms, i.e., the final discretization method is used.

A method is proposed for solving the problem of joint optimization according to system quality criteria of thermophysical processes of preheating and subsequent plastic deformation of metal semi-finished products in production complexes for metal forming under conditions of freedom of choice of acceptable initial temperature states before plastic deformation, linking these processes into a single technological system. Constructive methods have been developed for solving boundary value problems of optimizing the SRP for transferring an object to the required final state with extreme values of the optimized quality indicators in order to construct program control algorithms and a methodology for synthesizing closed loop systems with feedback. It is proposed to use exact descriptions of the behavior of the controlled variable within the considered class of models.

References

1. Gorbunov V. A. Ispol'zovanie neyrosetevy'h tehnologiy dlya povy'sheniya e`nergeticheskoy e`ffektivnosti teplotehnologicheskikh ustanovok [Use of neural network technologies to improve the energy efficiency of heating installations]. Ivanova. 2011. 476 p.
2. Fokin V. M., Boykov G. P., Vidin YU.V. Osnovy' e`nergoberejeniya v voprosah teploobmena [Basics of energy saving in heat exchange issues]. Moskva: Mashinostroenie, 2005. 192 p.
3. Borovskaya M. E., Termoe`konomicheskiy analiz kak e`lement diagnostiki snijeniya zatrat organizacii [Thermoeconomic analysis as an element of diagnostics to reduce organizational costs]. Minsk: BGTU, 2018. 87 p.
4. Van'ko V. I., Ermoshina O. V., Kuvyrkin G. N. Variacionnoe ischislenie i optimal'noe upravlenie [Calculus of variations and optimal control]. Moskva: MGTU im. N.E` . Bauman, 2006, 488 p.

5. Yusupbekov N., Gulyamov Sh., Avazov u., Zaynutdinova M., Khojiyeva N. Analysis of Information Characteristics Objects of Chemical Technology // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019. Vol. 6, is. 5. Pp. 9453–9459.
6. Yusupbekov N. R., Gulyamov S. H. M., Muhitdinov D. P., Avazov YU. SH. Matematicheskoe modelirovanie processov rektifikatsii mnogokomponentny'h smesey [Mathematical modeling of rectification processes for multicomponent mixtures], Tashkent 2014. 156 p.
7. Yusupbekov N. R., Gulyamov S. M., Zainutdinova M. B., Khozhieva N. Z. Analysis of information characteristics objects of chemical technology // Chemical Technology, Control and Management. 2019. Vol., is. 1. Article 6. Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ijctcm/vol2019/iss1/6>.
8. Rapoport E., Pleshivtseva Yu., Livshits M. Alternance Method in Problems of Induction Heating Processes: Basic Principles and Experience of Applications // Proceedings ISEF'99, International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering. Pavia, Italy, September 23-25, 1999. Pp. 141–144. 42.
9. Rapoport E., Pleshivtseva Yu., Livshits M., Rudnev P. Universal Method for Optimization of Induction Heating Processes. // Proceedings 8th International Induction Heating Seminar. Kissimmee, Florida, November, 3-6, 1998.
10. Плешивцева Ю. Э., Каргов А. И. Алгоритмы оптимального по быстродействию пространственно-временного управления процессами нагрева тела цилиндрической формы // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. «Технические науки». Самара: СамГТУ, 1998. Вып. 5. С. 191–194.
11. Юсупбеков Н. Р., Гулямов Ш. М., Зайнутдинова М. Б., Хожиева Н. Ж. Анализ информационных характеристик объектов химической технологии // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, 2019. №1 (85). С.83–88.
12. Хожиева Н. Ж. Методы и алгоритмы информационной поддержки принятия решений в информационно-управляющих системах. Ташкент, 202. 41 с.
13. Tommila T., Hirvonen J., Jaakkola L., Peltoniemi J.. Next generation of industrial automation. Concepts and architecture of a component-based control system //VTT Technical Research Centre of Finland. 2005. Pp. 58–63.
14. Yusupbekov N. R., Gulyamov S. M., Avazov Y. Sh., Khojiyeva N. J. Methods of organizing energy-closed technology // International scientific and technical journal «Chemical technology. Control and management». Tashkent, 2020. No. 2 (92). Pp. 21–28.

УДК 621.314.25

Повышение эффективности транспорта электроэнергии с использованием трансформаторного преобразователя числа фаз и многофазной линии электропередачи Improving the efficiency of electricity transport using a transformer number phases converter and multiphase power transmission line

Ю. В. Москалев

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Yu. V. Moskaev

Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье выполнено сравнение нагрузочных потерь мощности в трехфазной и многофазной линиях электропередачи. Приведено расчетное выражение для определения нагрузочных потерь мощности в многофазной линии. Изображена схема соединения обмоток трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки. С использованием такого трансформатора можно реализовать многофазную линию электропередачи с любым необходимым числом фаз. Составлены схемы замещения трехфазной электрической цепи с соединением фаз «треугольником» и семифазной цепи с соединением фаз «многоугольником». Выполнен расчет нагрузочных потерь мощности и значений коэффициента полезного действия трехфазной и семифазной линий. Коэффициент полезного действия для рассмотренных линий электропередачи при одинаковой передаваемой мощности, напряжении, длине линий и площади поперечного сечения проводников всех фаз равен 96,9 % и 99,2 % соответственно.

Ключевые слова: преобразователь числа фаз, трансформатор, многофазная обмотка, многофазная линия электропередачи, потери мощности

Abstract. The article compares the power losses in three-phase and multiphase power transmission lines. The calculated expression for determining the power losses in a multiphase line is given. The diagram of the connection of the windings of a three-phase-multiphase transformer converter of the number of phases with a serial connection of the coils of each phase of the secondary winding is shown. Using such a transformer, it is possible to implement a multiphase power transmission line with any required number of phases. The substitution schemes of a three-phase electrical circuit with a "triangle" phases connection and a seven-phase circuit with a "polygon" phases connection have been compiled. The calculation of the load power losses and the values of the efficiency of three-phase and seven-phase lines is performed. The efficiency coefficient for the considered power transmission lines with the same transmitted power, voltage, line length and cross-sectional area of conductors of all phases is 96.9% and 99.2%, respectively.

Keywords: phase number converter, transformer, multiphase winding, multiphase power transmission line, power loss

I. Введение

Повышение энергетической эффективности различных технических систем является актуальным направлением научных исследований [1].

Передача и распределение электрической энергии обеспечивается с использованием трехфазных электрических сетей, при этом для снижения нагрузочных потерь при одинаковой передаваемой мощности можно увеличивать напряжение и (или) уменьшать активное сопротивление проводов линии [2].

При повышении напряжения необходимо обеспечивать усиление изоляции линии и электрических аппаратов, увеличивается охранная зона линии, возрастают токи утечки через изоляцию, усиливается электромагнитное излучение, а также ионизационные процессы вокруг проводов, что приводит к дополнительным потерям мощности. Поперечное сечение проводников, которое определяет активное сопротивление, выбирают исходя из экономической плотности тока [3], поэтому снижение потерь за счет увеличения поперечного сечения провода линии экономически не целесообразно.

Одним из способов повышения эффективности передачи электроэнергии является использование сверхпроводящих кабельных линий постоянного или переменного тока [4]. При этом конструкция сверхпроводящих кабельных линий значительно сложнее и дороже, чем у традиционных кабельных линий, также необходима дополнительная инфраструктура: криогенная станция, специальные токовые вводы, соединительные муфты, преобразовательные подстанции для согласования линии электропередачи постоянного тока с системой электроснабжения переменного тока, системы диагностики, управления и защиты.

Например, итоговые потери в сверхпроводящей кабельной линии постоянного тока длиной 10 км на передаваемую мощность 100 МВт оцениваются величиной не более 2,5 % от передаваемой мощности, в эти потери входят затраты мощности криогенной системы для компенсации всех теплопритоков в «холодную» зону и потери в преобразователях [4].

В настоящее время продолжают исследования многофазных линий электропередачи с числом фаз большим трех и различным номинальным напряжением [5-10]. Многофазные линии электропередачи имеют ряд преимуществ в сравнении с трехфазными линиями: большая пропускная способность при одинаковых габаритах, напряжении, сечении проводов; меньше потери энергии; уменьшение электромагнитного воздействия на окружающую среду [5].

Увеличение количества изолированных фаз воздушной или кабельной линии приводит к усложнению конструкции линии и релейной защиты, следовательно, к увеличению стоимости, при повреждении многофазной линии требуется гораздо более дорогостоящие восстановительные работы.

Необходимо отметить, что для снижения потерь мощности также на практике используют различных организационные и технические мероприятия, например, выравнивание графиков нагрузок, компенсация реактивной мощности, уменьшение несимметрии токов и напряжений и другие [2].

II. Постановка задачи

Для работы многофазной линии электропередачи необходим преобразователь числа фаз для согласования такой линии с трехфазной сетью. Среди различных преобразователей числа фаз часто используются трансформаторные преобразователи (ТПФ) как наиболее простые, надежные и дешевые [9-11]. Преобразование числа фаз можно обеспечить с использованием ТПФ с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки [5,12]. Схема соединения обмоток такого преобразователя приведена на рис. 1, где w_i – число витков катушек вторичной обмотки.

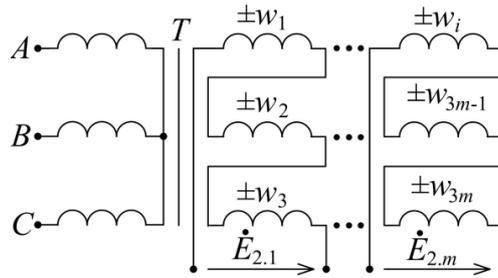


Рис. 1. Схема соединения обмоток трехфазно-многофазного ТПФ с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки

ТПФ со схемой соединения обмоток (см. рис. 1) позволяет получить любое необходимое число фаз вторичной обмотки (две или больше). В [13] рассмотрен подход, с использованием которого можно определить минимальное число витков каждой катушки и схему соединения вторичной обмотки трехфазно-многофазного ТПФ с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки. Многофазную обмотку трансформатора, к которой подключается линия электропередачи, можно соединить многоугольником или многолучевой звездой. Выполним расчет нагрузочных потерь мощности многофазной линии электропередачи при соединении многофазной обмотки ТПФ многоугольником.

III. Теория

При соединении вторичной обмотки трансформатора многоугольником для симметричной многофазной системы действующие значения линейных $I_{л}$ и фазных I_{ϕ} токов связаны следующим соотношением:

$$I_{л} = 2 \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) I_{\phi}, \quad (1)$$

где m – число фаз, $m \geq 3$.

Нагрузочные потери мощности в многофазной линии можно рассчитать по выражению:

$$\Delta P_{лп} = m I_{л}^2 R, \quad (2)$$

где R – активное сопротивление линейного провода многофазной линии электропередачи, Ом.

Фазный ток обмотки, соединенной многоугольником, равен:

$$I_{\phi} = \frac{S}{m U_{\phi}}, \quad (3)$$

где S – полная мощность, которая передается в линию от многофазной вторичной обмотки, ВА;

U_{ϕ} – действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки, В.

С учетом выражений (1) и (3) формулу (2) можно записать следующим образом:

$$\Delta P_{лп} = 4m \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{m}\right) \frac{S^2}{m^2 U_{\phi}^2} \rho \frac{mL}{S_{пр}}, \quad (4)$$

где $S_{пр}$ – поперечное сечение токоведущих жил всех фаз, m^2 ;

ρ – удельная проводимость материала токоведущей жилы, Ом м;

L – длина линии, м.

В результате потери активной мощности многофазной линии электропередачи можно определить по формуле:

$$\Delta P_{лп} = 4 \sin^2\left(\frac{\pi}{m}\right) \frac{S^2}{U_{\phi}^2} \rho \frac{L}{S_{пр}}, \quad (5)$$

При одинаковой передаваемой полной мощности S , фазном напряжении U_{ϕ} и суммарном поперечном сечении токоведущих элементов $S_{пр}$ изготовленных из одинакового материала, можно определить во сколько раз нагрузочные потери мощности в многофазной линии будут меньше, чем в трехфазной линии электропередачи:

$$\frac{\Delta P_{лп,3}}{\Delta P_{лп,m}} = \frac{3}{4 \sin^2(\pi/m)}. \quad (6)$$

На рис. 2 приведена диаграмма, показывающая во сколько раз нагрузочные потери активной мощности в многофазной линии меньше, чем в трехфазной линии электропередачи.

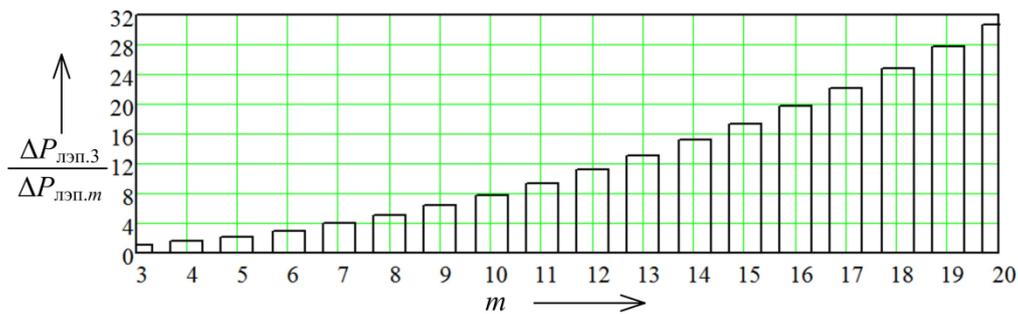


Рис. 2. Уменьшение нагрузочных потерь активной мощности в многофазной линии электропередачи в зависимости от числа фаз

Выполним расчет потерь мощности в установившемся режиме работы трехфазной и семифазной линий электропередач при одинаковых значениях полной мощности, фазном напряжении, длине линии и суммарной площади поперечного сечения всех фаз.

На рис. 3 и 4 приведены трехфазная и семифазная системы с соединением фаз вторичной обмотки трансформатора и нагрузки в «треугольник» и «многоугольник» соответственно.

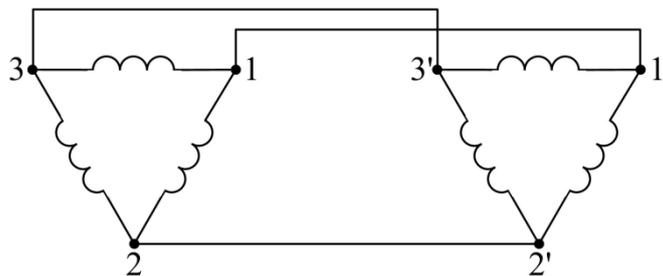


Рис. 3. Трехфазная система с соединением фаз в «треугольник»

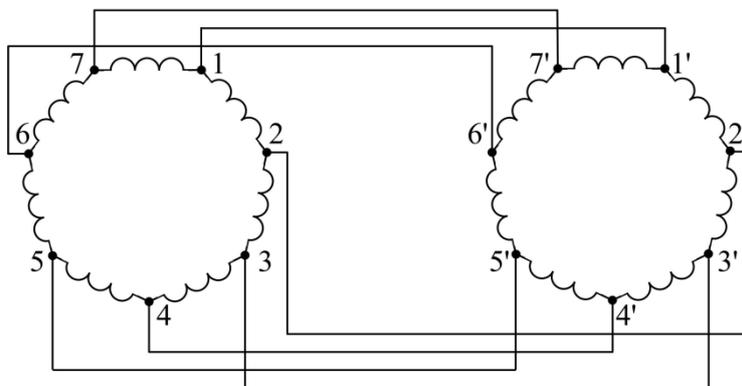


Рис. 4. Семифазная система с соединением фаз в «многоугольник»

При расчете приняты следующие допущения: многофазная система симметричная, все элементы линейные, на выводах вторичной многофазной обмотки ТПФ формируется симметричная система синусоидальных ЭДС, отношение индуктивного сопротивления к активному сопротивлению проводов трехфазной и семифазной линии одинаковое.

На рис. 5 и 6 представлены схемы замещения трехфазной и семифазной электрической цепи с соединением фаз вторичной обмотки трансформатора и нагрузки в «треугольник» и «многоугольник» соответственно.

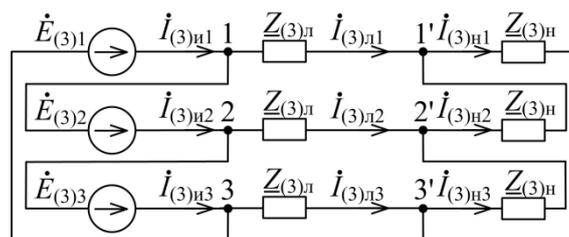


Рис. 5. Схема замещения трехфазной электрической цепи с соединением фаз в «треугольник»

Выполним расчет для трехфазной кабельной линии электропередачи напряжением 10 кВ длиной 4 км. Активное и индуктивное сопротивление кабеля ААБ 3х50 равны 2,48 Ом и 0,36 Ом соответственно [14]. Для линии с номинальным напряжением 10 кВ можно не учитывать активную проводимость, обусловленную токами утечки через изоляцию, емкость между проводами разных фаз и емкость провод – земля [14]. По кабельной линии передается активная и реактивная мощность 800 кВт и 600 квар.

Анализ схемы замещения (см. рис. 5) выполнен при следующих значениях ЭДС и сопротивлений ветвей: $E_{(3)} = 10$ кВ; $Z_{(3)л} = (2,48 + j 0,36)$ Ом; $Z_{(3)н} = (232,56 + j 178,92)$ Ом.

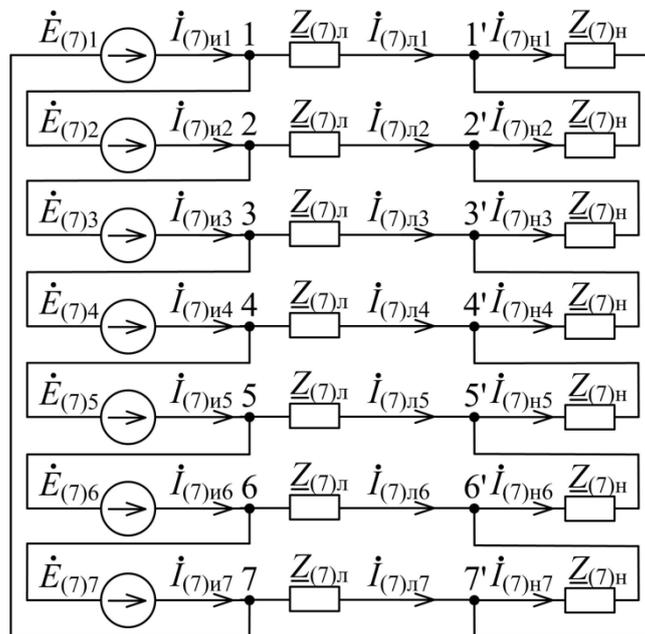


Рис. 6. Схема замещения семифазной электрической цепи с соединением фаз в «многоугольник»

Анализ схемы замещения (см. рис. 6) выполнен при следующих значениях ЭДС и сопротивлений ветвей: $E_{(7)} = 10$ кВ; $Z_{(7)л} = (5,79 + j 0,84)$ Ом; $Z_{(7)н} = (555,64 + j 419,37)$ Ом.

IV. Результаты экспериментов

В результате расчета получены следующие действующие значения линейных и фазных токов трехфазной цепи: $I_{(3)л} = 33,33$ А; $I_{(3)н} = 57,73$ А; $I_{(3)н} = 33,33$ А. Активная мощность каждой фазы источника равна 266,67 кВт, фазы нагрузки – 258,40 кВт, потери в линейных проводах равны 24,8 кВт, что составляет 3,1 % от отдаваемой активной мощности в линию.

Для семифазной цепи действующие значения линейных и фазных токов: $I_{(7)л} = 14,29$ А; $I_{(7)л} = 12,40$ А; $I_{(7)н} = 14,29$ А. Активная мощность каждой фазы семифазного источника равна 114,29 кВт, фазы нагрузки – 113,40 кВт, потери в линейных проводах равны 6,23 кВт, что составляет 0,78 % от отдаваемой активной мощности в семифазную линию.

Таким образом, значения коэффициента полезного действия для рассмотренных линий электропередачи при одинаковой передаваемой мощности, фазном напряжении, длине линий и суммарной площади поперечного сечения всех фаз равны 96,9 % и 99,2 % соответственно.

V. Обсуждение результатов

Потери активной мощности в семифазной линии в 3,98 раза меньше, чем в трехфазной линии, что соответствует значению, рассчитанному по выражению (6) при $m = 7$.

При увеличении количества фаз вторичной обмотки ТПФ и многофазной линии электропередачи уменьшается действующее значение тока в линейных проводах, что позволяет снизить потери мощности при передаче электроэнергии.

VI. Выводы и заключение

В результате можно сделать следующие выводы:

1) Снижение нагрузочных потерь при передаче электроэнергии можно обеспечить за счет повышения напряжения, уменьшения активного сопротивления проводов линии электропередачи, увеличения числа фаз.

2) При увеличении числа фаз линии электропередачи необходимо использовать трансформаторные преобразователи числа фаз для согласования многофазной линии с трехфазной системой электроснабжения.

3) Выполнено сравнение нагрузочных потерь в трехфазной и многофазной линии электропередачи при одинаковой передаваемой мощности, фазном напряжении, длине линий и суммарной площади поперечного сечения всех фаз. Приведено расчетное выражение, с использованием которого можно рассчитать нагрузочные потери в линии электропередачи с числом фаз большим трех.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.
2. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Москва: ЭНАС, 2009. 456 с.
3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. Санкт-Петербург: ДЕАН, 2008. 704 с.
4. Сытников В. Е., Рябин Т. В., Сорокин Д. В. Высокотемпературные сверхпроводящие кабельные линии постоянного тока – шаг к умным электросетям // Энергосбережение. 2016. № 7. С. 42–55.
5. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование многофазных линий электропередачи: монография. Иркутск: ИрГУПС, 2014. 168 с.
6. Гершенгорн А. И. Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // Электрические станции. 1994. № 8. С. 67–70.
7. Rao K., Kumar T., Raghunadh I. A Narrative Approach to Five Phase Transmission System // International Journal for Modern Trends in Science and Technology. 2016. Vol. 2, is. 06. Pp. 60–66.
8. Pierre B. J., Heydt G. T. Transposition and voltage unbalance in high phase order power transmission systems // Electric Power Components and Systems. 2014. Vol. 42, is. 15. Pp. 1754–1761.
9. Jyothi B., Pandian A., Bhavana P. Fabrication and Experimental Analysis of Multiple-Winding Transformers for Multiphase Supply // Measurement and Control. 2020. Vol. 53, is. 3–4. Pp. 1–17.
10. Guangye L., Yihan Y. Three-phase-to-four-phase transformer for four-phase power-transmission systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2002. Vol. 17. Pp. 1018–1022.
11. Рогинская Л. Э., Ялалова З. И. Определение электромагнитной мощности фазообразующих трансформаторов преобразовательных установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9, № 2. С. 18–23.
12. Ronsin F. Transformateur diphasé-triphasé. Patent RF.1990. no. 2648612.
13. Москалев Ю. В. Оптимизация схемы соединения и количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 17–24.
14. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.

УДК 621.313

Расчет параметров нерегулируемого устройства для компенсации реактивной мощности трехфазного асинхронного двигателя **An unregulated device parameters calculation for compensation reactive power of a three-phase asynchronous motor**

Ю. В. Москалев, Р. В. Сергеев, А. П. Попов
Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Yu. V. Moskalev, R. V. Sergeev, A. P. Popov
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация. Для повышения энергетической эффективности систем электроснабжения существуют различные организационные и технические мероприятия. В электрических сетях переменного тока для уменьшения потерь мощности используют компенсирующие устройства, которые позволяют уменьшить реактивную составляющую тока в линиях электропередачи, распределительных трансформаторах и сетях предприятий. Асинхронные электродвигатели и трансформаторы потребляют 60-80 % реактивной мощности в промышленных электросетях. В статье рассмотрен подход для определения параметров нерегулируемого компенсирующего устройства, которое используется для индивидуальной компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя. Компенсирующее устройство состоит из трех ветвей, каждая ветвь содержит

емкостной и индуктивный элементы, соединенные между собой последовательно. Реактивная составляющая тока, потребляемая двигателем из электрической сети, рассчитана с использованием Г-образной схемы замещения. Определение параметров элементов устройства выполнено на основании известной величины реактивной составляющей тока статора двигателя в режиме холостого хода. Приведены графики изменения действующего значения тока, потребляемого из сети, а также графики изменения коэффициента мощности двигателя без компенсирующего устройства и с подключением такого устройства.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, реактивная мощность, коэффициент мощности, компенсирующее устройство, коэффициент мощности

Abstract. In order to improve the energy efficiency of power supply systems, there are various organizational and technical measures. In AC electrical networks, compensating devices are used to reduce power losses, which make it possible to reduce the reactive component of the current in power transmission lines, distribution transformers and enterprise networks. Asynchronous electric motors and transformers consume 60-80% of the reactive power in industrial power grids. The article considers an approach for determining the parameters of an unregulated compensating device, which is used for individual compensation of the reactive power of an asynchronous motor. The compensating device consists of three branches, each of which contains capacitive and inductive elements connected to each other in series. The reactive component of the current consumed by the motor from the electrical network is calculated using an replacement circuit. The parameters of the reactive elements of the device are determined based on the known value of the reactive component of the motor stator current in idle mode. Graphs of changes in the effective value of the current consumed from the mains by the motor, as well as graphs of changes in the power factor of the motor without a compensating device and with the connection of such a device are given.

Keywords: asynchronous motor, reactive power, power factor, compensating device, power factor

I. Введение

Повышение энергетических показателей различных электроприемников и электрических сетей позволяет уменьшить расход электроэнергии и повысить энергетическую эффективность системы электроснабжения [1-3].

В настоящее время электропривод потребляет более 60 % всей вырабатываемой электроэнергии в стране [1], поэтому повышение КПД и коэффициента мощности асинхронных электрических машин как наиболее распространенных на практике является актуальным направлением исследований [1,2,4].

II. Постановка задачи

Потери мощности в линиях электропередачи и силовых трансформаторах существенно зависят от коэффициента мощности нагрузки [1]:

$$\frac{\Delta P_{\cos\varphi}}{\Delta P_{\cos\varphi=1}} = \frac{1}{\cos^2\varphi}. \quad (1)$$

Коэффициент мощности асинхронных двигателей малой (0,5 – 20 кВт) и средней (20 – 250 кВт) мощности в номинальном режиме находится в диапазоне 0,70 – 0,92, при этом при уменьшении нагрузки на валу этот показатель значительно снижается и на холостом ходу составляет 0,15 – 0,20 [2,5].

В настоящее время известны различные способы повышения коэффициента мощности отдельных электроприемников и в целом электрических сетей предприятий [3,4,6-8]. Наиболее простыми и дешевыми являются компенсирующие устройства, реализованные с использованием реактивных элементов, соединенных в различные схемы [3].

Определим параметры трехфазного нерегулируемого компенсирующего устройства с симметричной структурой для индивидуальной компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя. Такое устройство состоит из трех ветвей, каждая ветвь содержит емкостной и индуктивный элементы, соединенные между собой последовательно. Рассмотрим компенсирующие устройства с соединением цепей реактивных элементов «звездой» (рис. 1,а) и «треугольником» (рис. 1,б).

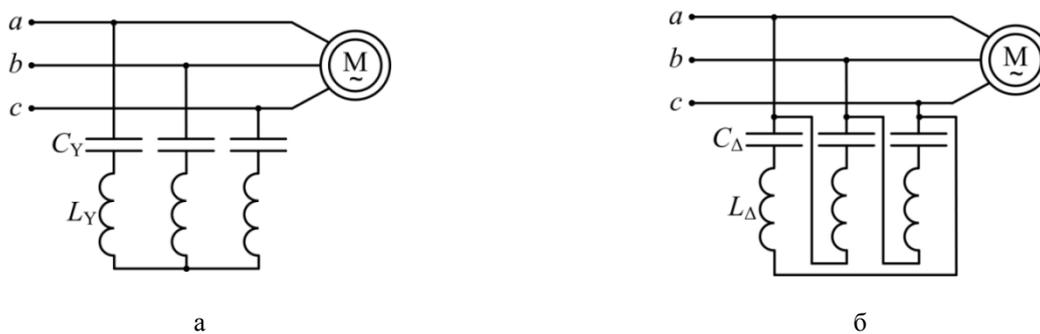


Рис. 1. Электрические схемы подключения нерегулируемого компенсирующего устройства с соединением реактивных элементов: а – «звездой»; б – «треугольником»

При расчете не учитывается активное сопротивление реактивных элементов, входящих в структуру компенсирующего устройства.

III. Теория

Каждая фаза асинхронного двигателя может быть представлена с использованием Г-образной схемы замещения (рис. 2, а) и ее эквивалентной схемы (рис. 2, б).

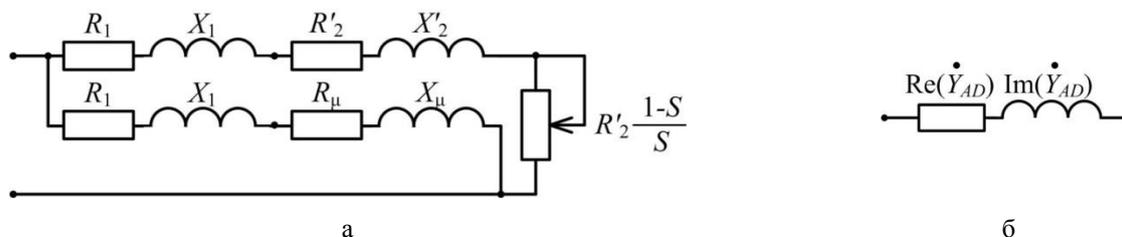


Рис. 2. Схема замещения асинхронного двигателя

Для расчета действительной и мнимой составляющих эквивалентной комплексной проводимости фазы асинхронного двигателя в зависимости от скольжения с использованием схемы замещения получаем:

$$\operatorname{Re}(\dot{Y}_{AD}(S)) = \frac{R_1 + R_\mu}{(R_1 + R_\mu)^2 + (X_1 + X_\mu)^2} + \frac{R_1 + \frac{R'_2}{S}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}; \quad (2)$$

$$\operatorname{Im}(\dot{Y}_{AD}(S)) = -\frac{X_1 + X_\mu}{(R_1 + R_\mu)^2 + (X_1 + X_\mu)^2} - \frac{X_1 + X'_2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}. \quad (3)$$

Для определения значений емкости и индуктивности элементов нерегулируемого КУ (рис. 1) использовано выражение:

$$X = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}, \quad (4)$$

где f – частота переменного напряжения сети, Гц.

Реактивное сопротивление на частоте 50 Гц равно, Ом:

$$X_{50} = 100\pi L - \frac{1}{100\pi C}. \quad (5)$$

Для того, чтобы на частоте 50 Гц было емкостное сопротивление ветвей резонансная частота f_p должна быть больше частоты 50 Гц. Величина индуктивности L , при которой резонанс будет на частоте больше 50 Гц равна, Гн:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_p^2 C}. \quad (6)$$

В системе электроснабжения из-за подключения к ней нелинейных потребителей возникают нечетные гармоники напряжений и токов. Для уменьшения вероятности появления резонансных явлений на частотах

высших гармоник при подключении устройства сопротивление ветвей должно иметь индуктивный характер на частотах этих гармоник. При расчете параметров устройства примем резонансную частоту f_p равную 135 Гц, в этом случае сопротивление цепи на частотах третьей и других нечетных гармоник будет иметь индуктивный характер.

С использованием формул (5) и (6) можно получить выражение для расчета емкости C в зависимости от заданного значения емкостного сопротивления по основной частоте ($X_{50} < 0$), Ф:

$$C = \left(\frac{25}{\pi f_p^2} - \frac{1}{100\pi} \right) \frac{1}{X_{50}}. \quad (7)$$

В качестве примера рассмотрим асинхронный двигатель типа 4A225M4У3 с номинальной мощностью 55 кВт. Параметры Г-образной схемы замещения такого двигателя приведены в таблице [5].

ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТИПА 4A225M4У3

P_n , кВт	η_n , о.е.	$\cos\varphi_{1n}$, о.е.	S_n , о.е.	Параметры схемы замещения, Ом					
				R_μ	X_μ	R_1	X_1	R'_2	X'_2
55	0,925	0,91	0,015	2,55	9,44	0,06	0,19	0,03	0,31

Графики изменения активной и реактивной составляющих тока обмотки статора асинхронного двигателя типа 4A225M4У3 в зависимости от скольжения ($U_{ном} = 220$ В) представлены на рис. 4.

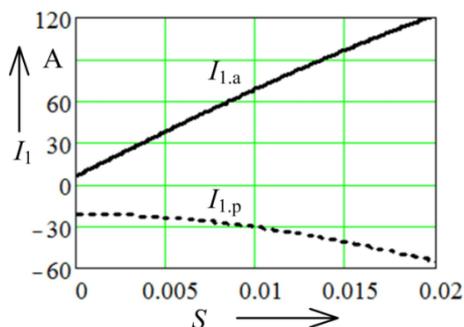


Рис. 3. Изменение активной и реактивной составляющих тока обмотки статора асинхронного двигателя типа 4A225M4У3 в зависимости от скольжения

Как можно видеть на рис. 3, при увеличении нагрузки на валу (скольжения) асинхронного двигателя увеличиваются активная и реактивная составляющие тока обмотки статора. При использовании нерегулируемого компенсирующего устройства значение емкостного сопротивления на основной частоте должно быть равно индуктивному сопротивлению двигателя в режиме холостого хода. Если использовать КУ с меньшим значением емкостного сопротивления, то в режиме холостого хода электрической машины будет перекомпенсация реактивной мощности.

С использованием формулы (3) можно определить реактивную составляющую проводимости в режиме холостого хода асинхронного двигателя типа 4A225M4У3: $Im(Y_{AD}(0)) = -0,0967$ См (индуктивный характер). Емкостная проводимость ветви компенсирующего устройства будет равна 0,0967 См. По выражениям (6) и (7) рассчитаны емкость конденсаторной батареи и индуктивность. При соединении ветвей компенсирующего устройства «звездой» (см. рис. 1, а), емкость и индуктивность ветви устройства равны 265,6 мкФ и 5,23 мГн соответственно. При соединении ветвей «треугольником» (см. рис. 1, б) параметры также определены по формулам (6) и (7), при этом емкостное сопротивление X_{50} будет в три раза больше, чем при соединении «звездой» ($C_\Delta = 88,6$ мкФ, $L_\Delta = 15,7$ мГн).

IV. Результаты экспериментов

На рис. 4 и 5 приведены графики изменения действующего значения тока, потребляемого из сети асинхронным двигателем и коэффициента мощности $\cos\varphi$ двигателя типа 4A225M4У3 без подключения компенсирующего устройства и с таким устройством.

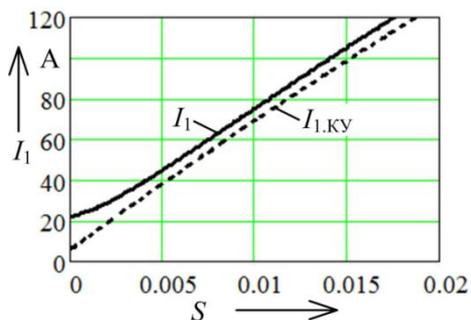


Рис. 4. Изменение действующего значения тока, потребляемого из сети асинхронным двигателем

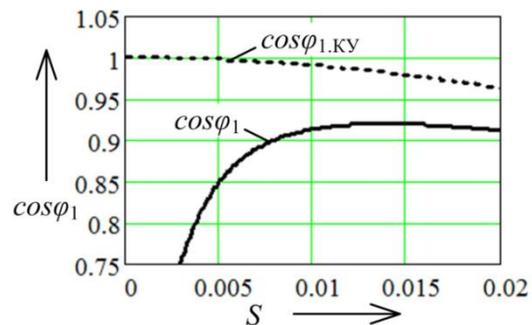


Рис. 5. Изменение коэффициента мощности асинхронного двигателя

V. Обсуждение результатов

Ток $I_{1.КУ}$, потребляемый из электрической сети, меньше тока двигателя I_1 на величину реактивной составляющей тока компенсирующего устройства (см. рис. 4). На рис. 5 показана зависимость коэффициента мощности от скольжения машины. Коэффициент мощности с компенсирующим устройством при увеличении нагрузки двигателя будет уменьшаться, так как возрастает реактивная составляющая тока асинхронного двигателя при увеличении нагрузки.

VI. Выводы и заключение

В результате можно сделать следующие выводы:

- 1) асинхронные двигатели часто используются в составе схем нерегулируемых электроприводов в различных отраслях промышленности и на транспорте, при этом на холостом ходу низковольтные асинхронные двигатели средней мощности потребляют из электрической сети реактивный ток 10 – 60 А.
- 2) Для компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя можно использовать наиболее простые и дешевые нерегулируемые компенсирующие устройства, реализованные с использованием реактивных элементов.
- 3) Предложен подход для определения параметров элементов трехфазного нерегулируемого компенсирующего устройства с симметричной структурой. В качестве примера выполнен расчет необходимых значений емкости и индуктивности ветвей компенсирующего устройства для асинхронного двигателя с номинальной мощностью 55 кВт.

Список литературы

1. Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. Москва: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.
2. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 350 с.
3. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Москва: ЭНАС, 2009. 456 с.
4. Мугалимов Р. Г., Губайдулин А. Р., Мугалимова А. Р. Электроприводы на основе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности для волочильных станков // Электротехника. Москва. 2009. № 10. С. 22–27.
5. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И. [и др.]. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. Москва: Энергоиздат, 1982. 504 с.
6. Дубровская Т. И., Ковженкин В. С., Певцова Л. С. Индивидуальная компенсация реактивной мощности // Электрика. 2009. № 10. С. 15–17.
7. Готман В. И. Критерии оценки экономической эффективности компенсации реактивной мощности в электроснабжении // Электричество. 2009. № 12. С. 13–18.
8. Котеленец Н. Ф., Семикин С. А., Мощинский Ю. А., Кириякин А. А. Оценка возможности применения встроенных конденсаторов для возбуждения асинхронных машин // Известия вузов. Электромеханика. 1991. № 4. С. 60–62.

Экспериментальные исследования определения продуктов коррозии в неоднородных железобетонных образцах методом лазерного атомно-эмиссионного спектрального анализа

Experimental studies of the determination of corrosion products in inhomogeneous reinforced concrete samples by laser atomic emission spectral analysis

Н. В. Волкова

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

N. V. Volkova

Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация. Предложена методика повышения точности при изменении условий проведения измерений количественного содержания коррозии в железобетонных конструкциях средствами лазерной спектрометрии. Для уменьшения погрешностей от неоднородности железобетонных образцов предлагается использовать устройство для подготовки проб, которое также позволяет снизить случайные погрешности параллельных измерений.

Ключевые слова: бетон, продукты коррозии, атомно-эмиссионный спектральный анализ, лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия, градуировочный график, составляющие погрешности, неоднородность железобетонных конструкций.

Abstract. A technique for increasing the accuracy under changing conditions for measuring the quantitative content of corrosion in reinforced concrete structures by means of laser spectrometry is proposed. To reduce errors due to heterogeneity of reinforced concrete samples, it is proposed to use a device for sample preparation, which also makes it possible to reduce random errors in parallel measurements.

Keywords: concrete, corrosion products, atomic emission spectral analysis, laser spark emission spectrometry, calibration graph, error components, heterogeneity of reinforced concrete structures.

I. Введение

Железобетонные конструкции (ЖБК) используются в опорах контактной сети системы электроснабжения железнодорожного транспорта. Особенностью этой системы является ее протяженность, поэтому необходимо применять простые в обращении мобильные диагностические комплексы.

Важным параметром, влияющим на эксплуатационные характеристики, является наличие коррозии в арматуре ЖБК.

Современные системы диагностирования железобетонных конструкций включают в себя большое число технических средств и методов, на которых они основаны. Наибольшую эффективность показали электрохимические, акустические и визуальные средства диагностирования коррозионного состояния. Каждый из данных методов имеет свои достоинства. Существенным недостатком же является косвенный способ измерения параметров, связанных с коррозией (изменение скорости распространения ультразвука, изменение переходного сопротивления металл-бетон-грунт, изменение амплитуды и спектра колебаний), по которым рассчитывается степень коррозии.

II. Постановка задачи

Актуальным является использование спектральных методов диагностирования. Однако для различных объектов диагностирования необходимо совершенствовать методическое и метрологическое обеспечение.

Таким образом, задачами исследования является разработка методики диагностирования коррозионного состояния внутренней поверхности железобетонных опор с использованием мобильного прибора лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС) и разработка методики устойчивого градуирования мобильного прибора ЛИЭС. Особое внимание необходимо уделить метрологическим характеристикам получаемых

результатов. Одним из факторов, ухудшающих составляющие погрешностей, является неоднородность железобетонных образцов.

III. Теория

В атомно-эмиссионном спектральном анализе (АЭСА) присутствуют погрешности при определении количественного содержания элемента. Основными источниками систематических погрешностей являются: влияние матричного состава пробы на интенсивность спектральных линий определяемых элементов; спектральные помехи; погрешности градуировки. К источникам общих случайных погрешностей в АЭСА можно отнести: нестабильность системы ввода пробы; нестабильность газовых потоков; нестабильность термохимических процессов в источнике возбуждения спектров; нестабильность системы регистрации сигнала (малый вклад); неоднородность состава исследуемых образцов [1]. Источником случайной долговременной погрешности является дрейф сигнала.

Градуировочные графики, построенные в различное время с изменением условий проведения эксперимента, изменяют свое положение, что вызывает значительные систематические погрешности в определении количественного состава анализируемых элементов [2]. На результат АЭСА оказывают влияние внешние факторы и износ элементов внутри прибора, который происходит постепенно в процессе эксплуатации.

IV. Результаты экспериментов

Изменение площади поперечного сечения арматурных стержней играет основную роль в обеспечении прочностных характеристик железобетонных опор, поддерживающих линии электропередач или контактного провода на железнодорожном транспорте. Эксперимент был проведен с помощью шести образцов сравнения, изготовленных из материала, аналогичного реальным железобетонным конструкциям, с заданным количеством хлорида железа ($FeCl_3$) в бетоне, как основного элемента коррозии арматурных стержней. Концентрация железа в образцах изменялась в диапазоне от 0,34 до 2,69 массовых долей.

Определение интенсивностей линий элементов, содержащихся в образцах, проводилось с помощью прибора LIBZ-300, представляющего собой портативный лазерный спектрометр с возможностью продувки области контроля инертным газом. Данный прибор обладает диапазоном спектральной чувствительности от 190 до 950 нм, источником возбуждения 5...6 МДж/импульс, лазерным источником 1064 нм и диаметром луча лазера ~ 50 мкм.

В качестве основных линий были выбраны линии железа Fe_1 (259,94 нм), а в качестве линий сравнения – линии Si_1 (288,16 нм), Si_2 (251,61 нм), Si_3 (252,85 нм). Данные линии были выбраны по причине того, что спектральный диапазон от 200 до 800 нм является наиболее важным для ЛИЭС, т.к. в данном диапазоне большинство элементов имеет хотя бы несколько эмиссионных линий [3], к тому же данные линии обладают наибольшей интенсивностью и наименьшим количеством спектральных помех (наложений) других линий.

По результатам эксперимента был построен градуировочный график (рисунок 1) зависимости относительной интенсивности от концентрации железа.

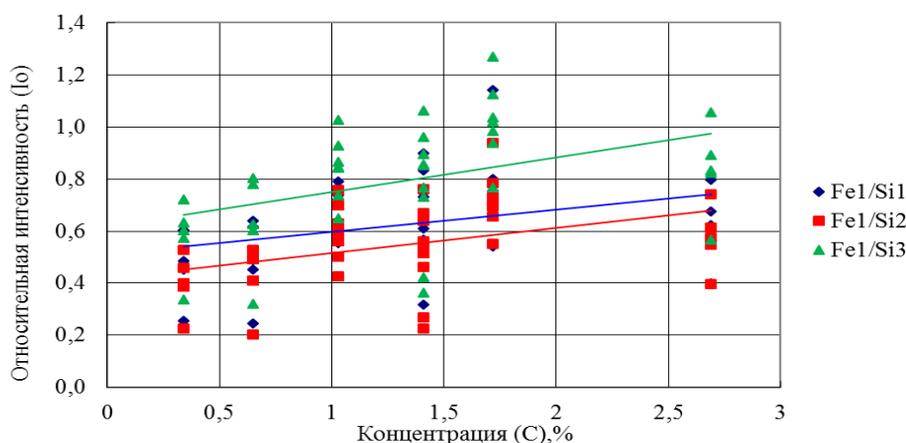


Рис. 1. Градуировочный график по результатам эксперимента

V. Обсуждение результатов

Величина достоверности аппроксимации по параметру R^2 составила достаточно низкие значения – 0,092; 0,154 и 0,170 соответственно выбранным линиям сравнения. Поэтому для дальнейшего улучшения метрологических характеристик были использованы многолинейчатые градуировки с оптимизацией регрессионных коэффициентов. Для тех же интенсивностей излучения построены регрессионные зависимости методом «внутреннего стандарта». В качестве аналитических линий использованы спектральные линии железа (259,94 нм, 263,08 нм и 302,06 нм), в качестве линий сравнения использованы спектральные линии кремния (288,16 нм, 251,61 нм и 252,85 нм). В результате математической обработки измерений случайные погрешности параллельных измерений уменьшились в 4,6 раза. Величина достоверности аппроксимации по параметру R^2 увеличилась соответственно до значений 0,83; 0,89 и 0,91 по сравнению с данными, приведенными на рис. 1.

VI. Выводы и заключение

Предложенная методика повышения стабильности и уменьшения временного дрейфа градуировочных графиков предполагает измерение нескольких линий анализируемого элемента (многолинейчатая градуировка) и нескольких линий сравнения, имеющих различные энергетические характеристики, для уменьшения влияния внешних факторов на проведение эксперимента. Данная методика также позволяет существенно повысить точность при изменении условий проведения эксперимента и снизить затраты, т.к. нет необходимости использовать дорогостоящие стандартные образцы для корректировки положения градуировочных зависимостей.

Для уменьшения погрешностей от неоднородности железобетонных образцов предлагается использовать устройство для подготовки проб [4]. Устройство содержит торцевую фрезу и ультразвуковой генератор для измельчения навески пробы. Сбор мелкодисперсного материала производится в контейнер при помощи внешнего компрессора. Собраный материал прессуется в таблетки, которые отправляются на анализ с использованием лазерного спектрометра. При этом также снижаются случайные погрешности параллельных измерений для каждого из образцов сравнения (рис. 1).

Повышение точности, снижение стоимости проведения измерений, уменьшение погрешностей от неоднородности железобетонных образцов позволит определять коррозионное состояние железобетонных конструкций в полевых условиях.

Источник финансирования. Благодарности

Научный руководитель – Кузнецов Андрей Альбертович, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения», доктор технических наук, доцент.

Список литературы

1. Пупышев А. А. О возможности снижения систематических и случайных погрешностей атомно-эмиссионного спектрального анализа с использованием многолинейчатой градуировки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1–2. С. 20–30.
2. Буравлев Ю. М. Основы атомно-эмиссионного спектрального анализа металлов и сплавов. Донецк: ДонНУ, 2001. 358 с.
3. Кремерс Д. А., Радзиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия пер. с англ. А. А. Горбатенко [и др.]; под общ. ред. Н. Б. Зорова. Москва: Техносфера, 2009. 360 с.
4. Пат. 206890 Российская Федерация, МПК В24В 1/04 (20006.01). Ультразвуковое устройство для отбора проб с труднодоступных поверхностей железобетонных конструкций / Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Кузьменко А. Ю., Шныптев И. А., Волкова Н. В. № 2021101531; заявл. 25.01.2021; опубл. 30.09.2021.

Анализ изображений поверхности железобетонных образцов подверженных коррозии Analysis of Surface Images of Reinforced Concrete Specimens Subject to Corrosion

А. А. Кузнецов, Г. В. Волчанин

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Andrey A. Kuznetsov, Georgy V. Volchanin

Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье рассматривается возможность определения количественной оценки коррозии железобетонных конструкций с помощью обработки изображений, полученных от технических средств визуального контроля. Вычисляется среднее значение насыщенности всех пикселей. Количественная оценка осуществляется путем измерения площади коррозии при различных значениях порогов и определения местоположения центров областей с высокой степенью коррозии на изображении.

Ключевые слова: Железобетонные конструкции, коррозия, визуальный контроль, формирование панорамного изображения, количественная оценка коррозии.

Abstract. The article considers the possibility of determining a quantitative assessment of the corrosion of reinforced concrete structures using the processing of images obtained from technical means of visual control. The average saturation value of all pixels is calculated. Quantification is carried out by measuring the area of corrosion at various threshold values and determining the location of the centers of areas with a high degree of corrosion in the image.

Key words: Reinforced concrete structures, corrosion, visual inspection, panoramic imaging, corrosion quantification.

I. Введение

Железобетонные конструкции широко применяются для изготовления и эксплуатации элементов в строительстве, транспорте, энергетике и других отраслях. Эксплуатация на открытом воздухе при влиянии различных агрессивных факторов часто приводит к коррозии и последующей потере прочностных характеристик.

Одним из последствий коррозии является разрушение арматурных стержней, обеспечивающих прочностные характеристики железобетонных конструкций. Распространение продуктов коррозии в объеме железобетона от арматурного стержня к поверхности рассмотрено в работе [1]. Повышенное содержание продуктов коррозии в железобетоне изменяет цветовые параметры поверхности. В первую очередь продукты окисления железа (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $FeOOH$ и др.) имеют характерные оттенки желто-оранжево-коричневого цвета. Связь изменения цвета с концентрацией продуктов коррозии в железобетоне приведена в работе [2].

Поэтому проверка поверхности железобетонных изделий через регулярные промежутки времени и поддержание целостности конструкции является задачей самого высокого приоритета. Современные методы контроля включают магнитно-резонансную томографию, ультразвуковой контроль, контроль параметров вибрации при воздействии механическими импульсами, прямую оценку внешней коррозии, электрохимические и др. Проверка коррозионного состояния однотипных опор, эксплуатируемых на участке протяженностью в несколько километров, может оказаться неэффективной (более трудоемкой) при использовании большинства действующих методов. Таким образом, существует необходимость в разработке быстрого и надежного метода обнаружения коррозии железобетонных конструкций (на примере опор контактной сети железнодорожного транспорта). Некоторые из вышеупомянутых проблем, возникающих в случае внешней коррозии, могут быть решены с помощью методов компьютерного моделирования.

Важной операцией при осуществлении обследования коррозионного состояния является ведение базы данных о текущем состоянии однотипных объектов с выделением объектов, находящихся на особом контроле.

II. Постановка задачи

Ранее исследователи применяли различные методы количественного и качественного обнаружения коррозии на поверхности материалов, и некоторые из этих исследований обсуждаются ниже.

Использовали обработку изображений для определения количества трещин и расположения трещин на изображениях листового металла. Изображения были сняты с помощью видеокамеры и линейного лазера, а обработка изображений была выполнена с помощью программного обеспечения MATLAB [3].

Предложен способ контроля поверхностных дефектов на металлах, включая коррозию используя методы обработки изображений. Изображения были получены с помощью специализированной камеры Raspberry Pi. Полученные изображения были преобразованы из RGB (красный, зеленый и синий) в HSV (оттенок, насыщенность, яркость) пространстве, и для обнаружения коррозии использовалось определенное пороговое значение области, основанное на цвете коррозии [4].

Другим направлением обработки изображений является определение типа коррозии на основе морфологии корродированной поверхности. Выборка из 197 изображений, сделанных при помощи оптического микроскопа, была использована для обучения и тестирования классификации. Восемнадцать атрибутов, которые представляют цвет, структуру и форму, были повторно использованы в качестве функций. Пространство объектов было уменьшено до двух измерений с использованием многомерного масштабирования (анализ главных координат) и классификация типов коррозии была проведена с использованием линейных классификаторов [5].

Одна из первых попыток количественно оценить точечную коррозию с помощью цифровой обработки изображений была предпринята в статье [6]. Для нержавеющей стали типа AISI 304L после обработки раствором $FeCl_3$ оценивали стойкость к образованию точечных дефектов, определяемую как отношение количества дефектных пикселей к общему количеству пикселей.

В статье [7] был предложен основанный на компьютерном зрении метод оценки коррозионных дефектов на материалах с покрытием с использованием метода сегментации водоразделов. Авторами разработки был использован метод оценки площади корродированного изображения и его отношение к процентной доле корродированного изображения дефектов.

Из приведенной выше литературы можно сделать вывод, что значительный объем исследований был проведен в области идентификация коррозии с использованием инструментов обработки изображений и машинного обучения, но была проделана недостаточная работа по количественной оценке коррозии на исследуемых поверхностях.

В статье предлагается алгоритм количественной оценки коррозии на поверхности железобетона и определения местоположения участков с наибольшим содержанием продуктов коррозии, вышедших на поверхность по изменению цветовых параметров.

Панорамное изображение исследуемой поверхности состоит из отдельных снимков, имеющих одинаковый размер и различные координаты. Формирование панорамного изображения при помощи мехатронного комплекса на основе эндоскопа показано в работе [8].

Ранее пороговые значения применялись для обнаружения участков с максимальной коррозией на поверхности металлических трубопроводов [9].

Наиболее важным шагом в разработке любой промышленной системы машинного зрения является определение существующих ограничений окружающей среды, чтобы правильно выбрать исследуемую область системы машинного зрения и ускорить дальнейшую обработку изображений [9]. Выявленные ограничения помогают нам выбирать подходящие алгоритмы и методы для разработки эффективного модуля зрения. Ограничения сцены, которые можно легко определить во время осмотра внутренней поверхности, заключаются в следующем:

- Цвет внутренней поверхности железобетонной трубы без коррозии и цвет коррозии на поверхности трубы.
- На захваченном изображении обычно присутствуют различные объекты, такие как чистый бетон, коррозия на поверхности и возможные нарушения сплошности (трещины, сколы и др.).
- Камера должна быть ограничена фокусировкой и захватом только нужной части поверхности проверяемой опоры.

Первое ограничение, указывающее на цвет коррозии, имеет решающее значение для обнаружения и количественной оценки участков коррозии на данном изображении. Второе и третье ограничения могут быть использованы для того, чтобы отличить области коррозии от возможных дефектов типа трещины, сколы и др.

Изображения представленного образца поверхности бетона сняты с помощью камеры мобильного телефона с разрешением 8 мегапикселей при дневном свете. Изображения внутренней поверхности полый железобетонной реальной опоры снимаются при помощи эндоскопа с искусственной светодиодной подсветкой. На исследуемом образце фон изображения не захватывается намеренно, чтобы упростить анализ изображения. Образец полученного изображения одного участка панорамной съемки показан на рис. 1.



Рис. 1. Пример изображения, полученного с помощью камеры мобильного телефона

Иногда захваченные изображения могут быть загрязнены шумом по разным причинам. Обычно это происходит во время получения или передачи изображения. В зависимости от шума, присутствующего на изображении, он в большей степени должен быть выявлен и удален на изображении перед его анализом. Например, метод медианной фильтрации может быть использован для удаления шума светлых и темных пикселей, присутствующих на изображении.

III. Теория

Идентификация коррозии на изображении в цветовом пространстве RGB требует больших вычислительных мощностей, поскольку хроматическая составляющая изображения может быть получена только с использованием информации от всех трех каналов, а именно красного, зеленого и синего. Была разработана компьютерная программа для обработки изображения и поиска участков коррозии. Изображение в оттенках серого не может быть легко использовано для идентификации коррозии в цветовом пространстве RGB . Данное изображение преобразуется в HSI (оттенок (H), насыщенность (S) и интенсивность (I)) цветовое пространство, в котором можно легко различить хроматические и ахроматические компоненты изображения. Компонент насыщенности изображения может быть легко использован для обнаружения коррозии. Например, исходное изображение в пространстве RGB , приведенное, преобразуется в HSI -параметры, по результатам обработки которых все участки изображения категоризируются по степени коррозионных отложений, где черный цвет максимальная степень коррозии, а белый – отсутствие коррозионных отложений.

Преобразование изображения из цветового формата RGB в цветовое пространство HSI осуществляется с использованием уравнений, приведенных ниже [9]

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{if } B < G; \\ 360 - \theta, & \text{if } B > G, \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{где } \theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\left[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)^{1/2} \right]} \right\}; \quad (2)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)]; \quad (3)$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B). \quad (4)$$

Значения RGB должны быть нормализованы до диапазона $[0, 1]$, а угол измеряется относительно красной оси цветового пространства HSI .

Чтобы определить, подвержена ли поверхность коррозии или нет, вычисляется среднее значение насыщенности всех пикселей. Если вычисленное среднее значение оказывается больше определенного порогового значения, обнаруживается коррозия. Это очевидно из того факта, что корродированная поверхность имеет более высокое значение компонента насыщенности, чем поверхность бетона, которая обычно окрашена в светлые цвета, такие как серый или белый [9]. Порог может быть выбран эмпирически, и он в основном зависит от условий эксплуатации. Более высокий или более низкий порог может быть выбран в зависимости от состояния поверхности, параметров пористости бетона и др.

Как только коррозия обнаружена, заключительным шагом является количественная оценка коррозии различными способами, чтобы стало легче идентифицировать наиболее критический регион, и можно было выдвинуть некоторую гипотезу о природе коррозии на основе распределения продуктов коррозии по поверхности.

Для количественной оценки коррозии были рассчитаны следующие показатели.

Процент коррозии измерялся следующим образом:

Доля коррозии (S_{korr} , %) определялась, как отношение количества пикселей с коррозией (N_{korr}) к общему количеству пикселей на изображении поверхности (N).

$$S_{korr} = N_{korr} / N. \quad (5)$$

Количество пикселей, идентифицированных, как подверженные коррозии, зависит от выбранного порога, и поэтому процент коррозии измерялся с учетом четырех различных пороговых значений.

Процент площади, поврежденной в результате коррозии. Общеизвестно, что области, окружающие проржавевшие участки, подвержены легкой коррозии. Чтобы определить количество пикселей, пораженных коррозией, предполагается, что все пиксели в окрестности корродированного пикселя считаются поврежденными. Эта мера также зависит от выбранного порогового значения и была рассчитана для четырех различных пороговых значений, как уточненная площадь повреждения (S_{korr55} , %) равнялась отношению количества пикселей, лежащих в окрестности 5×5 всех пикселей коррозии (N_{korr55}) к общему количеству пикселей на изображении (N).

$$S_{korr55} = N_{korr55} / N. \quad (6)$$

IV. Результаты экспериментов

Обнаружение коррозии. Чтобы обнаружить коррозию на данном изображении, пороговое значение для средней составляющей насыщенности изображения эмпирически выбирается равным 0,05. Фактическое вычисленное значение среднего значения составляет 0,13, что намного выше выбранного порога. Таким образом, это явный признак наличия коррозии. Только в случае обнаружения коррозии изображение будет дополнительно проанализировано для получения различных признаков коррозии.

Количественная оценка коррозии. Коррозия была определена количественно несколькими способами, в результате работы разработанной программы обработки изображений и ручным способом выделения анализируемых площадей.

Процент коррозии. Коррозия, наблюдаемая после установления порога насыщенности компонента изображения с различными значениями, показана на рис. 2, где t – среднее значение насыщенности компонента изображения. Очевидно, что при использовании более высокого порогового значения количество элементов, идентифицированных как подверженные коррозии, уменьшается, и, следовательно, процент коррозии также уменьшается, как показано в таблице 1. Чтобы подтвердить процент коррозии, полученный с помощью анализа изображений, важно измерить процент коррозии физически и сравнить оба результата.

Однако, поскольку коррозия обычно распространяется по всей поверхности трубы, измерить ее для определенного порога насыщенности компонента практически невозможно. Таким образом, физическое измерение было выполнено путем печати двоичных изображений для четырех различных пороговых значений на стандартном листе бумаги формата A4, а процент площади аппроксимирован как отношение площади корродированного участка на листе к площади пропорциональной размеру всего изображения. Замечено, что процент корродированной области, полученный с помощью физического измерения, немного выше, чем процент области, полученной с помощью анализа изображений. Это связано с локальным приближением коррозии по замкнутым границам на изображении.

ТАБЛИЦА 1

ПРОЦЕНТ ПЛОЩАДИ КОРРОЗИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Номер опыта	Порог насыщен.	Число пикс. коррозии	Площадь коррозии, % (по изображен.)	Площадь коррозии, % (по экспер.)
1	t	88576	19,5	20,2
2	$2t$	52756	10,8	11,2
3	$3t$	26345	8,9	9,4
4	$4t$	8098	5,3	6,0

Процент площади, поврежденной из-за коррозии, был вычислен для четырех различных пороговых значений с учетом трех различных размеров окрестности вокруг пикселя для каждого порога. Замечено, что процент поврежденных пикселей обратно пропорционален величине порогового значения и прямо пропорционален размеру окрестности вокруг пикселя. Вычисленные значения площади повреждения приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2

ПРОЦЕНТ ПОВРЕЖДЕННОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ РАЗНЫХ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ И РАЗНЫХ ОКРЕСТНОСТЕЙ ВОКРУГ ПОВРЕЖДЕННОГО ПИКСЕЛЯ

Номер опыта	Порог насыщен.	Число пикс. коррозии (окно 5*5)	Площадь коррозии, % (окно 3*3)	Площадь коррозии, % (окно 5*5)	Площадь коррозии, % (окно 7*7)
1	t	114820	24,3	30,2	36,6
2	$2t$	86523	16,2	18,6	20,2
3	$3t$	41654	9,1	12,6	15,1
4	$4t$	23894	6,2	8,0	11,2



а

б

Рис. 2. Определение площади коррозии при различных порогах t : пороговое значение t (Уровень > 25%; Процент коррозии: 19,5%); пороговое значение $2t$ (Уровень > 50%; Процент коррозии: 10,8%)

VI. Выводы и заключение

Предложен новый метод обнаружения и количественной оценки коррозии на поверхности бетонной трубы с использованием методов цифровой обработки изображений. Обнаружение коррозии осуществляется путем преднамеренного захвата только части поверхности бетона и применения порогового значения к среднему значению насыщенности изображения. Количественная оценка осуществляется путем измерения площади коррозии, поврежденной области и определения местоположения центров областей с высокой степенью коррозии на изображении.

Чтобы повысить надежность обнаружения коррозии, другие характеристики, связанные с текстурой и формой, могут быть использованы в будущей работе. Так же планируется использовать образцовые методы

определения количественного состава продуктов коррозии на выделенных участках поверхности и привязки реперных значений к параметрам цветовой обработки оптического изображения.

Список литературы

1. Брюхова А. С., Кузнецов А. А. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 160–164.
2. Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Кузьменко А. Ю., Волчанин Г. В. Определение электрокоррозионного состояния железобетонных конструкций по параметрам изменения цвета на видеоизображении // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 75–79.
3. Motamedi M., Faramarzi F., Duran O. New concept for corrosion inspection of urban pipeline networks by digital image processing // IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. 2012. Montreal. QC: IEEE. 2012. Pp. 1551–1556.
4. Lohade D. M., Chopade P. B. Real Time Metal Inspection for Surface and Dimensional Defect Detection Using Image Processing Techniques. // Paper presented at: EEECOS-2016 – 3rd International Conference on Electrical, Electronics, Engineering Trends, Communication, Optimization and Sciences. 2016. Pp. 873–877.
5. Choi K. Y., Kim S. S. Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing // Corrosion Science. 2005. Vol 47, is.1. Pp. 1–15.
6. Itzhak D., Dinstein I., Zilberberg T. Pitting corrosion evaluation by computer image processing // Corrosion Science. 1981. Vol. 21, is. 1. Pp. 17–22.
7. Ji G., Zhu Y., Zhang Y. The corroded defect rating system of coating material based on computer vision // In Transactions on Edutainment VIII. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. Pp. 210–220.
8. Kuznetsov A.A., Ponomarev A.V., Fomichenko K.I., Gritsutenko A.D., Volchanin G.V. Image Processing for Visual Inspection of Hollow Reinforced Concrete Supports' Inside Surfaces // Lecture Notes in Networks and Systems Springer Natures. 2022. Vol. 4. Pp. 54–60.
9. Bondada V., Pratihara D.K., Kumar C.S. Detection and quantitative assessment of corrosion on pipelines through image analysis // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 133. Pp. 804–811.

УДК 514.18

Анализ положения геометрических объектов пространства приращений обобщенных координат механизма манипулятора экскаватора

Position Analysis of Geometric Objects in Space of Increments Generalized Coordinates of Excavator Manipulator Mechanism

И. С. Кузнецов, Ф. Н. Притыкин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

F. N. Pritykin, I. S. Kuznetsov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. Обеспечение положения режущей кромки ковша экскаватора и ее перемещения по траектории требует от оператора определенных навыков во время выполнения работы. Одной из актуальных задач является решение проблемы разработки автоматизированной системы управления. Для ее работы необходимо контролировать изменение углов в механизмах поворота манипулятора. В статье решены некоторые геометрические задачи, которые использованы при разработке алгоритма моделирования движения ковша экскаватора. Исследованы геометрические объекты в пространстве приращения обобщенных координат.

Ключевые слова: плоскости пространства приращений обобщенных координат, геометрическое моделирование, синтез движения, механизм манипулятора экскаватора, ремонт трубопроводов, компьютерное моделирование движений, выходное звено.

Аннотация. To ensure the position of the excavator bucket cutting edge and its movement along the track, the operator must possess certain skills while working. One urgent task is to solve the problem of developing an automated control system. In order to function, it is necessary to control the change of angles in the manipulator steering mechanisms. The article considers the algorithm of modelling the movement of the bucket of the excavator at the beginning of a given trajectory and the construction of traces of planes and their intersection point in the incremental space of generalized coordinates.

Ключевые слова: planes of the space of increments of generalized coordinates, geometric modeling, movement synthesis, excavator arm mechanism, pipeline repair, computer simulation of movements, output element.

I. Введение

Инфраструктура трубопроводного транспорта на территории нашей страны насчитывает десятки тысяч километров труб различного диаметра, срок эксплуатации многих из них подходит к концу. Поэтому актуальна проблема их своевременного ремонта, который заключается в замене старых трубопроводов новыми. Большинство труб проложены подземным способом, что ставит задачу выполнения подкопочных работ при помощи землеройных машин. Одной из основных машин для ремонта трубопровода является одноковшовый гидравлический экскаватор. Его ковш позволяет выполнить выемку грунта вокруг трубопровода для обеспечения дальнейших технологических операций. Процесс удаления грунта над верхней частью трубопровода сопряжен с риском его повреждения, что является недопустимым, особенно, если работы по ремонту выполняются при рабочем режиме прокачки трубопровода. В связи с этим в нормативных документах компаний, которые выполняют эксплуатацию трубопровода, обозначено минимальное допустимое расстояние от ковша экскаватора до стенки трубопровода [1–4].

Поэтому актуальной является задача по разработке системы автоматизации процесса подкопа трубопровода с наличием блока управления гидроаппаратурой, обеспечивающей активную безопасность. Это позволит исключить вероятность повреждения трубопровода ковшом экскаватора [5–7].

При ремонте трубопроводов необходимо обеспечивать удаление грунта, находящегося непосредственно сверху его. При этом движение ковша должно быть обеспечено по траекториям, удаленным на заданном безопасном расстоянии от верхней стенки трубопровода. При использовании автоматизированной системы управления движением манипулятора экскаватора может быть использована линейная система уравнений, отражающая взаимосвязь приращений обобщенных координат от скоростей ковша, являющегося выходным звеном. При решении указанной линейной системы уравнений возникают так называемые погрешности линеаризации. Данные погрешности существенно влияют на отклонение ковша экскаватора от заданной траектории. С целью определения способа обеспечения движения ковша с заданным отклонением от заданной траектории в статье исследованы взаимные положения плоскостей, заданных линейными уравнениями. Сформулированы рекомендации на основе проведенного геометрического моделирования, позволяющие находить решения указанной системы уравнений, удовлетворяющие заданным требованиям.

Для разработки данной системы необходимо решить несколько геометрических задач (вычисление обобщенных координат механизма манипулятора экскаватора, углов ориентации ковша по отношению к базовой машине и трубопроводу и другие). Для решения поставленной задачи целесообразно использовать метод компьютерного геометрического моделирования.

II. Постановка задачи

Исходными данными задачи компьютерного моделирования движения ковша экскаватора являются геометрические параметры, которые представлены на рис. 1.

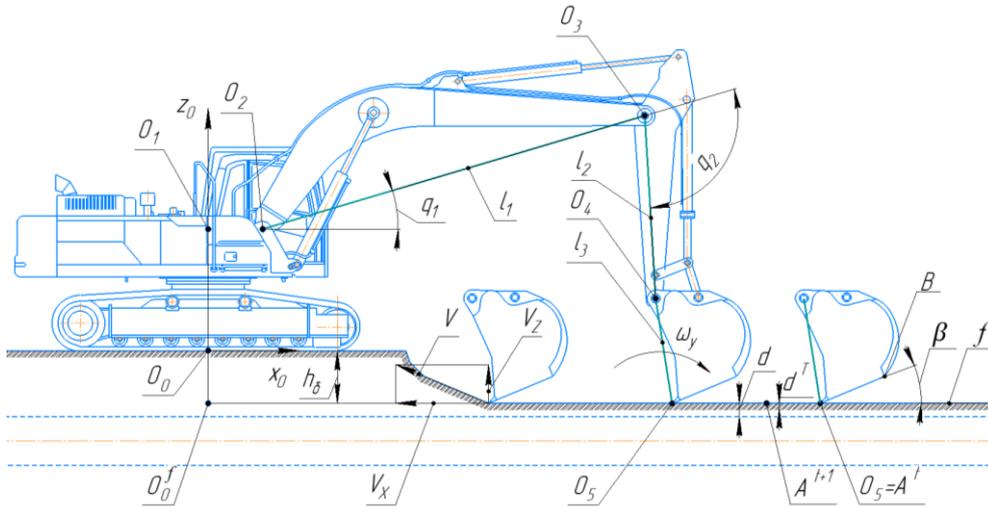


Рис. 1. Геометрические параметры положения манипулятора, ковша и трубопровода

Данными параметрами являются:

1. Длины звеньев l_1, l_2, l_3 и начальные значения трех обобщенных координат q_1, q_2 и q_3 , определяющих вращение звеньев механизма в кинематических парах, оси вращения которых проходят через точки O_2, O_3 и O_4 . Так как вращение механизма экскаватора вокруг оси z_0 не учитывается при моделировании движения ковша, то будем считать заданный механизм плоским.

2. Заданная траектория f движения точки O_5 и угол β ориентации ковша экскаватора в неподвижной системе координат $O_0x_0z_0$.

3. Безопасное расстояние d от ковша до верхней кромки ремонтируемого трубопровода и заданное расстояние d^T , характеризующее погрешность линеаризации или отклонение точки центра выходного звена от заданной траектории f при расчете следующей конфигурации.

Выходными данными поставленной задачи являются графики, отражающие изменение обобщенных координат при заданной точности позиционирования ковша экскаватора при движении по траектории.

III. Теория

При использовании автоматизированной системы управления движением манипулятора экскаватора может быть использована линейная система уравнений, определяющая взаимосвязь приращений обобщенных координат от скоростей ковша, являющегося выходным звеном [8, 9].

$$\begin{aligned} J_{11}\Delta q_1 + J_{12}\Delta q_2 + J_{13}\Delta q_3 &= V_x^{05}, \\ J_{21}\Delta q_1 + J_{22}\Delta q_2 + J_{23}\Delta q_3 &= V_z^{05}, \\ J_{31}\Delta q_1 + J_{32}\Delta q_2 + J_{33}\Delta q_3 &= \omega_y, \end{aligned} \quad (1)$$

где Δq_i – приращение обобщенных координат за одну итерацию, заданную промежутком времени t ; J_{ij} – коэффициенты матрицы частных передаточных отношений; V^{05} (V_x^{05}, V_z^{05}) – проекции вектора скорости точки O_5 на неподвижные оси системы координат $O_0x_0z_0$ (см. рис. 1); ω_y – угловая скорость поворота системы координат $O_5x_5z_5$, связанной с ковшом вокруг оси O_5y_5 , проходящей через точку O_5 . При проведении вычислительных экспериментов были заданы следующие значения указанных скоростей: $V_x = 18$ см/сек., $V_z = 1.5$ см/сек., $\omega_y = 0.05$ град/сек. При этом допустимое отклонение от заданной траектории принято $d^T \leq 3$ см.

Третье линейное уравнение системы (1) необходимо для обеспечения ориентации ковша в неподвижной системе координат. Точка A' задает начальную точку участка траектории, на котором обеспечивается наклон режущей кромки O_5B к горизонтали, определяемый углом β (рис. 1). Траектория движения f находится на глубине h_δ от поверхности грунта и на безопасном расстоянии d от верхней кромки трубопровода [4–7].

Отклонение положения точки O_5 от заданной траектории f обозначено параметром d^T (см. рис. 1). При совместном решении линейных уравнений (1) может возникнуть ситуация, когда значение параметра d^T получается больше заданной точности позиционирования δ центра выходного звена [10, 11]. Параметр d^T определяет удаление точки O_5^T , полученной реализацией значений Δq_i ($q_i = q_i + \Delta q_i$) за одну итерацию от заданной траектории f . Данный параметр вычисляется по формуле:

$$d^T = \frac{|a \cdot (r_0 - r_t)|}{|a|}, \quad (2)$$

где \mathbf{a} – направляющий вектор прямой f , \mathbf{r}_0 – радиус вектор точки O_5^T , \mathbf{r}_t – радиус вектор точки A^t , через которую проходит прямая f .

На рис. 2а,б,в представлены расчетные конфигурации при использовании системы (1) для трех различных положений механизма манипулятора. Положения механизма соответствуют удалению точки $O_5 = A^t$ от точки $O_0^f \in f$, равному 921, 690 и 421 сантиметров. На рис. 2а,б,в с правой стороны представлены увеличенные фрагменты взаимного положения точки O_5 по отношению к траектории f после расчета (2) следующей конфигурации.

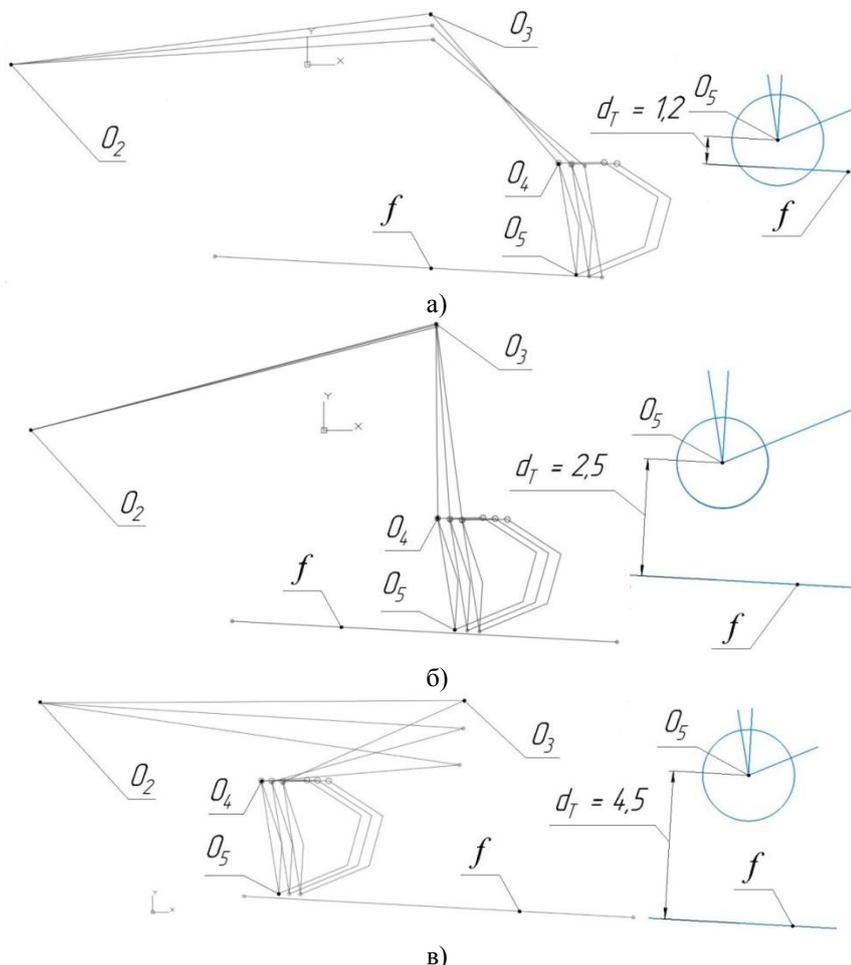


Рис. 2. Результаты компьютерного геометрического моделирования движения рабочего оборудования экскаватора на различных участках траектории: а) начальное положение $O_0^f O_5 = 921$ см; б) срединное положение $O_0^f O_5 = 690$ см; в) конечное положение $O_0^f O_5 = 421$ см

С целью определения влияния кинематических параметров движения манипулятора экскаватора на отклонение от заданной траектории ковша (см. рис. 2а,б,в) исследуем положения плоскостей, заданных системой (1) в пространстве приращений обобщенных координат.

Для этого построим следы плоскостей для нескольких положений механизма манипулятора на исследуемом участке траектории, чтобы определить приращения обобщенных координат, заданных координатами Δq_i точки пересечения указанных плоскостей (1).

IV. Результаты экспериментов

На рис. 3 и 4 построены следы α_1^Q , α_2^Q плоскости α^Q штрихпунктирной линией, соответствующей первому уравнению системы (1). Условимся геометрические объекты, относящиеся к пространству приращения обобщенных координат, обозначать с верхним индексом Q . Следы β_1^Q , β_2^Q плоскости β^Q изображены штриховой линией. При этом указанная плоскость определяется вторым уравнением системы (1). Положение третьей плоскости γ^Q , соответствующей третьему уравнению системы (1), определяют следы плоскости γ_1^Q и γ_2^Q , которые изображены тонкой линией. Следы плоскостей α^Q , β^Q и γ^Q определены положениями точек, соответственно $\alpha^Q (A_1^Q, B_1^Q, C_1^Q)$, $\beta^Q (A_2^Q, B_2^Q, C_2^Q)$ и $\gamma^Q (A_3^Q, B_3^Q, C_3^Q)$. Координаты указанных точек вычислены при равенстве нулю двух других координат Δq_i . На рис. 3, 4 проекции отрезков $M_1^Q N_1^Q$, $M_2^Q N_2^Q$ и $M_4^Q N_4^Q$ задают линию пересечения плоскостей α^Q и β^Q . Для нахождения точки K^Q пересечения прямой $M^Q N^Q$ с плоскостью γ^Q

используется дополнительная плоскость проекций Π_4 . На данной плоскости проекций плоскость γ^Q проецируется в линию γ_4^Q .

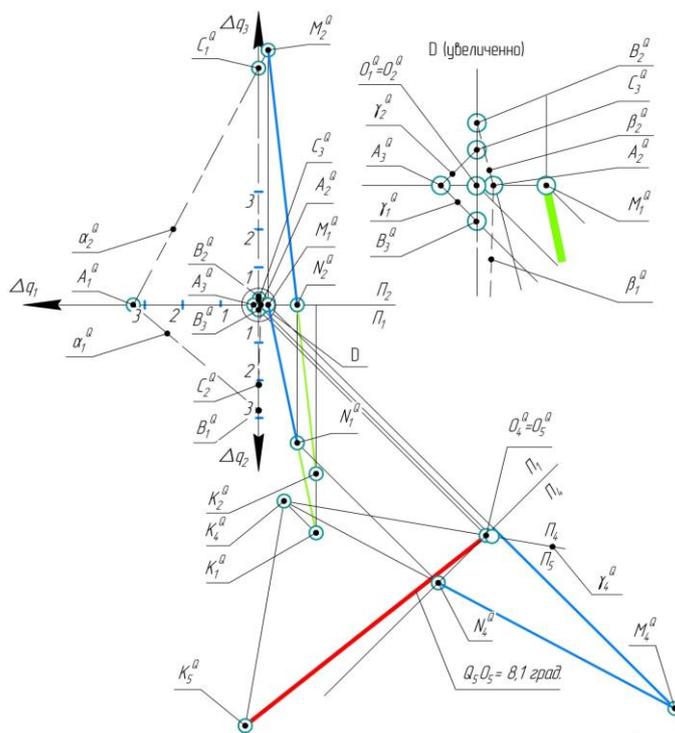


Рис. 3. Положения следов плоскостей α^Q , β^Q , γ^Q и точки пересечения K^Q данных плоскостей при $O_5^Q O_5 = 921$ см. в пространстве приращений обобщенных координат

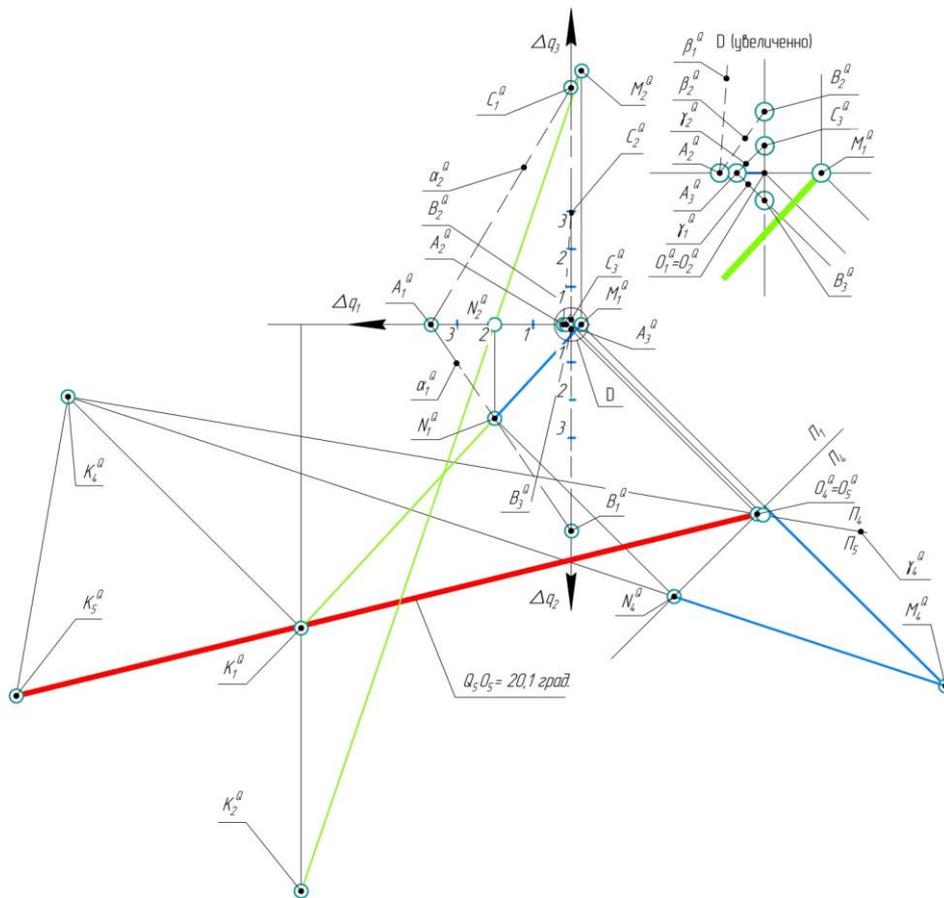


Рис. 4. Положения следов плоскостей α^Q , β^Q , γ^Q и точки пересечения K^Q данных плоскостей при $O_5^Q O_5 = 421$ см. в пространстве приращений обобщенных координат

V. Обсуждение результатов

Анализ графических построений, связанных с определением точки K^Q в пространстве приращений обобщенных координат для нескольких различных положений механизма манипулятора экскаватора (в статье приведены изображения только для двух положений ковша) позволяет сделать следующие выводы. При уменьшении длины отрезка $O_0^f O_5$ (рис. 1) происходит уменьшение угла наклона прямой $M_4^Q N_4^Q$ к следу плоскости γ_4^Q (см. рис. 3, 4). При этом точка K_4^Q значительно удаляется от начала пространства приращения обобщенных координат точки O_4^Q . При этом увеличиваются значения параметров Δq_1^Q , Δq_2^Q , Δq_3^Q , определяющих координаты точки K^Q . Анализ построения точки K^Q для различных случаев показывает, что оптимальными значениями вектора приращения обобщенных координат являются такие значения, при которых точка K^Q располагается внутри сферы с радиусом, равным 9.5 град. В этом случае отклонение d^T точки O_5 от заданной траектории происходит в пределах допустимой величины $d^T < 3$ см. Если точка N^Q не принадлежит указанной сфере, необходимо уменьшить значения скоростей, определяющих движение ковша, при расчете промежуточных конфигураций.

VI. Выводы и заключение

Анализ положения следов плоскостей α^Q , β^Q , γ^Q и точки пересечения K^Q данных плоскостей для различных положений механизма манипулятора экскаватора в пространстве приращения обобщенных координат может быть использован при разработке информационно-управляющих комплексов подвижных объектов, в частности при разработке автоматизированных систем управления движением рабочего оборудования экскаватора.

Список литературы

1. Аладинский В. В., Малков А. Г., Ушаков А. В. Метод ремонта газопроводов с использованием труб, бывших в эксплуатации // Территория Нефтегаз. 2009. № 8. С. 56–60.
2. Булавинцева А. Д., Мазуркин П. М. Динамика аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть» // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 4. С. 64–67.
3. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. 2016. Pp. 9-43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.
4. Демиденко А. И., Кузнецов И. С. Анализ устройств предотвращения повреждения стенки трубопровода // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. материалов II Национальной науч.-практ. конф., Омск, 18–19 апреля 2019 года. Омск: СибАДИ, 2019. С. 7–9.
5. Демиденко А.И., Кузнецов И.С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Вестник СибАДИ. 2020; 17(1): 12–21. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21.
6. Аникин Е.А. Эффективные методы ремонта магистральных трубопроводов. Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 108 с.
7. Кузнецов И. С. К вопросу автоматизации расчета магистрального нефтепровода // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Омск, 08–09 февраля 2018 года / Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Омск: СибАДИ, 2018. С. 19–24.
8. Притыкин Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с.
9. Whitney D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators // J. Dyn. Sys., Meas., Control. 2010. Vol. 94, is.4. Pp. 303–309.
10. Притыкин Ф. Н. Исследование кинематических параметров андроида при автоматизированном синтезе движений по вектору скоростей // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 5–9. DOI 10.25206/1813-8225-2022-182-5-9.
11. Притыкин Ф. Н. Моделирование гиперповерхностей, отражающих взаимосвязь кинематических параметров механизма андроида // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. Т. 19, № 7 (217). С. 21–29. DOI 10.14489/vkit.2022.07. pp. 021–029.

Стратегия внедрения цифровизации на заводах Strategy for the implementation of digitalization in factories

Н. О. Разуев¹, Д. С. Макашин^{1,2}

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

²Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

N. O. Razuev¹, D. S. Makashin^{1,2}

¹Omsk State Transport University, Omsk, Russia

²Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. Проведены теоретические исследования процесса цифровизации заводов и фабрик. Показаны методы и технологии преобразования фабрик в “умные”, а так же их преимущества.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, цифровизация, заводы, оцифровка фабрик, трансформация.

Abstract. Theoretical studies of the process of digitalization of factories and factories were carried out. Methods and technologies for converting factories into "smart" are shown, as well as their advantages.

Keywords: Industry 4.0, digitalization, factories, digitization of factories, transformation.

I. Введение

Исторические события, а также влияние глобализации вызвали необходимость изменения процессов в отдельных отраслях. Меняющиеся требования делают упор на гибкость производства, инновации и гибкость реагирования на изменения [1]. Необходимо двигаться в ногу со временем и быстро изменить структуру и организацию производства, что зачастую требует больших затрат времени и средств. Многие государства подготовили собственные инициативы по улучшению состояния промышленного производства. Известные подходы и инициативы включают «Фабрики будущего» или «Умную индустрию» [2]. Общим знаменателем всех инициатив является повышение уровня цифровизации и автономии процессов. Результат должен проявить себя в автономных интеллектуальных фабриках с интеллектуальными процессами, способными противостоять различным внешним или внутренним воздействиям. Такие заводы будут отличаться большей конкурентоспособностью. Таким образом, успех будущей деятельности компании будет зависеть от раннего обнаружения как потенциальных угроз, так и возможностей. В будущем интеллектуальные фабрики будут производить автономные транспортные средства, автомобили, поезда, средства общественного транспорта и так далее [3]. Все это будет возможно только за счет внедрения новых технологий и преобразования действующих производств путем цифровизации. Учитывая, что общество в целом находится под влиянием технологических достижений, отрасль также столкнется с новыми проблемами и потребностями. В большей степени это будет ощущаться во вспомогательных и обслуживающих процессах, так как технологически они развиваются несколько медленнее, чем основные производственные процессы. В настоящее время техническое обслуживание делится на оперативное обслуживание и профилактическое обслуживание. Основной задачей предприятий является перевод этих процессов в цифровую форму с помощью методологии цифровизации.

II. Технологии цифровизации

Производственные компании в двадцать первом веке сталкиваются со все более частыми и непредсказуемыми рыночными изменениями, вызванными глобальной конкуренцией. Индустрия 4.0 — это новая инженерная технология, которая обеспечивает экономичное и быстрое реагирование на изменения рынка и продукта. Одним из краеугольных камней Индустрии 4.0 являются экспоненциальные технологии, которые обеспечивают быстрый рост производительности и эффективности во всех областях промышленности и жизни людей. Некоторые из этих технологий становятся повседневной частью промышленности, например ИКТ и мобильные технологии, 3D-печать, робототехника, сенсорные приложения, частично искусственный интеллект. Используются и такие технологии, как нано-, био-, нейротехнологии, новая энергия или полное использование искусственного интеллекта.

III. Методология цифровизации

Автономные товары и транспортные средства будут использовать искусственный интеллект для автоматизации функций, ранее выполнявшихся людьми. В будущем продукты и услуги также будут интеллектуальными и ориентированными на клиента. Старые продукты и услуги будут преобразованы в новые виды продуктов и услуг, так называемые интеллектуальные. Такая автоматизация функций и оцифровка процессов выходят за рамки автоматизации, обеспечиваемой фиксированными моделями программирования.

Цифровизация и Индустрия 4.0 не ограничиваются заводскими технологиями. Они также означают коренное изменение содержания бизнеса, внедрение новых технологий на транспорте, связи с рынком, изменение внутреннего функционирования компании и т. д. Так же концепция умного производства должна использовать наборы знаний для создания нового стратегического плана на будущее.

IV. Трансформация производства

Путь цифровой трансформации завода — это не конечное состояние, это бесконечный путь построения бизнеса. Прежде чем фабрика вступит на путь преобразования и цифровизации, необходимо ответить на следующие вопросы:

- Зачем трансформировать?
 - Что трансформировать?
 - Как преобразовать?
- 1) Зачем трансформировать?

Этот вопрос должен стать фундаментальной отправной точкой для всех цифровых преобразований. Трансформация — это новый вызов и возможность. Поэтому предприятия должны иметь четкое представление о том, чего они хотят достичь. Можно констатировать, что некоторые секторы или, по крайней мере, их части окажутся в большей опасности, чем другие. Наиболее уязвимыми областями, скорее всего, будут гостиничный бизнес, розничная торговля, СМИ и услуги [4]. У этих сфер недостаточно ресурсов для модернизации своих цифровых процессов до такой степени, как, например, у крупных компаний. Сбой на рынке может произойти и внутри отдельных отраслей, например, если одна крупная компания в максимально возможной степени внедрит цифровизацию.

- 2) Что трансформировать?

Цифровая трансформация предприятия может принимать разные формы, но интеллектуальная трансформация требует расстановки приоритетов [5]. Вот некоторые области, которые могут быть преобразованы:

- Бизнес-модель (как зарабатываются деньги),
- Структура (как организовано предприятие),
- Люди (люди, которые работают на предприятии),
- Процессы (как они выполняются),
- ИТ-возможности (как информация собирается и управляется),
- Поставка (товары и услуги),
- Модель подотчетности (какова ваша подотчетность перед клиентами, поставщиками и т. д.).

- 3) Как преобразовать?

Важно иметь четкое представление о том, где требуется преобразование и что оно должно решать. Когда дело доходит до цифровизации предприятия, на этот третий вопрос труднее всего ответить, как и на постулирование того, что делать. На рынках присутствуют разные предприятия из разных отраслей промышленности. Чтобы успешно оцифровать предприятие, предприятия должны развивать базовые навыки, которые в совокупности можно охарактеризовать следующим образом: восприимчивость и открытость для цифрового бизнеса. Это утверждение опирается на три основных предположения (зачем трансформировать, что трансформировать, как преобразовать). Сейчас мы находимся в очень динамичной среде и бизнес должен это учитывать. Следует внимательно смотреть вокруг себя и следить за факторами, влияющими на них.

Возможности:

- Осведомленность о новых технологических трендах,
- Слежка за изменениями в конкурентной среде, а также в отдельных секторах,
- Сбор новых идей от сотрудников, поставщиков и клиентов.

V. Принятие решений на основе качественной информации

Информированное принятие решений основано на активном анализе информации, поступающей на предприятие извне, путем мониторинга окружающей среды и новых тенденций в обществе или отрасли, частью которой является предприятие. Важен внутренний обмен информацией между людьми или отделами [6]. Эта способность должна иметь сильную цифровую составляющую, такую как информационная система, основанная на знаниях, совместные системы удаленной связи, панели управления отображением информации и системы поддержки принятия решений. Бизнес не может обойтись без надлежащего управления знаниями в будущем.

Быстрое внедрение решений — решение этой задачи представляет собой комбинацию из двух компонентов: скорости и исполнения. И то, и другое очень важно для успешной трансформации. Способность заглянуть за пределы настоящего имеет решающее значение для понимания соответствующих тенденций; информированные решения необходимы для принятия правильных решений на основе соответствующей информации. Однако ни одна из этих возможностей не может быть реализована, если организация не сможет достаточно быстро внести необходимые изменения.

VI. Модель трансформации традиционных заводов

Основываясь на исследованиях [7–8], можно разработать модель оцифровки для преобразования классической фабрики в умную.

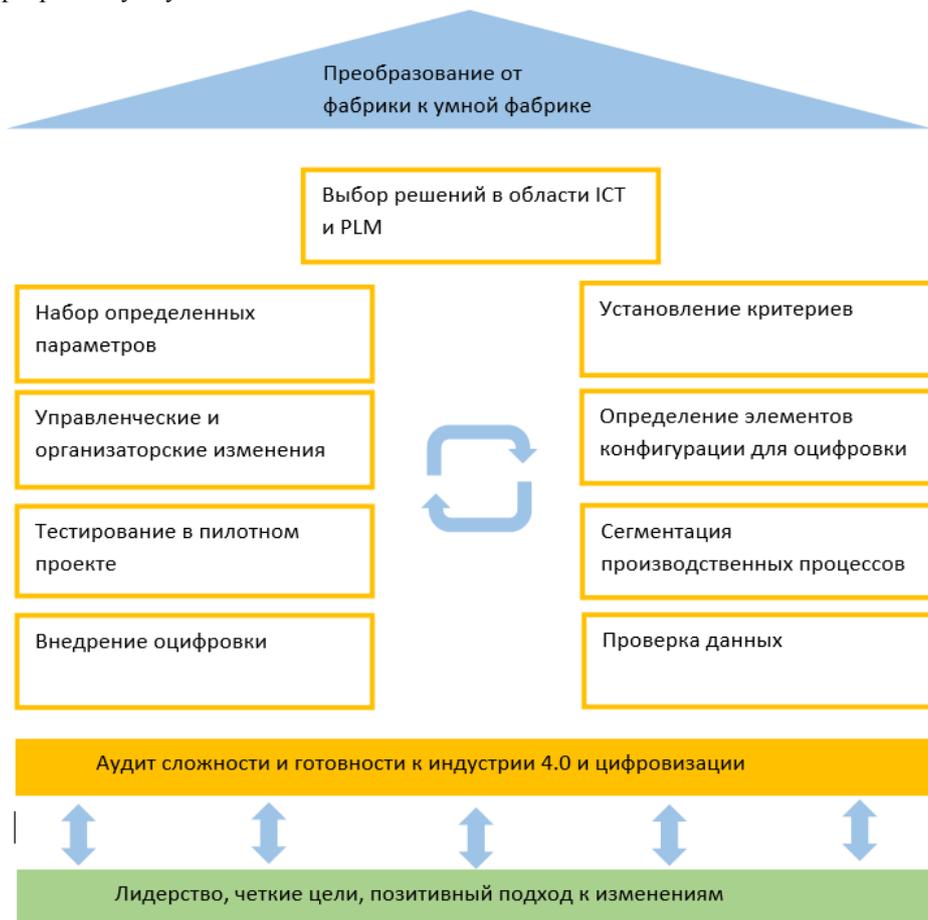


Рис. 1. Модель преобразования обычной фабрики в интеллектуальную

На следующем рис. 1 показана модель преобразования обычной фабрики в интеллектуальную. В результате получится следующее решение: Техник, отвечающий за ремонт автомобилей, использует систему управления транспортным средством. Он часто вынужден посещать центральную систему, чтобы найти необходимые детали и устранить неполадки. Ему определенно будет проще подключиться к такой системе. То же самое может относиться к документации, руководствам, инструкциям по обмену и так далее. Таким работникам, безусловно, было бы полезно сканировать, например, QR-код и получать информацию прямо на свой мобильный телефон или планшет, а не читать руководства пользователя. Такая цифровая система позволит фотографировать или снимать видео процесса установки или замены устройства, а также загружать это фото и видео в рамках отчета о ремонте. Рекомендовано разработать единую систему или создать ссылки, которые облегчили бы связь между различными программными пакетами. Цифровизация в этой форме откроет двери для множества новых возможностей. Это, однако, не означает, что заводы должны отказаться от использования старых решений. Производство так называемых базовых продуктов будет продолжаться, но в цифровом будущем можно будет комбинировать эти физические продукты с программными решениями, которые сделают их еще проще в использовании, создадут ценность и повысят изобретательность продукта, предоставив клиентам дополнительные возможности.

VII. Преимущества цифровизации

Из выпущенных в последнее время научных трудов [8-10] можно увидеть несколько общих показателей, оценивающих цифровизацию производства:

- Исключение человеческих ошибок
- Повышенная клиентоориентированность,
- Улучшение средней наработки на 74,5 %
- Повышение способности системы реагировать на незапланированные ситуации на 20 %
- Снижение частоты отказов от 15 до 38 %
- Увеличена готовность оборудования и машин на 1,6 %

- Снижение затрат на техническое обслуживание на 30 %
- Изменение соотношения планового обслуживания к обслуживанию после отказа (с 30 % - 70 % до 70 % - 30 %)

VIII. Заключение

Глобализация свободного рынка и вытекающие из этого неограниченные возможности применения компонентов, произведенных компанией на одном конце света, в продуктах другой, находящейся за полмира, оказывает все большее давление на качество, точность и надежность, а также на гибкость производства. С появлением Индустрии 4.0 и цифровизации фабрики должны сделать большой скачок. Все, что можно автоматизировать, будет автоматизировано. Однако некоторые вещи автоматизировать труднее, чем другие. В данной работе рассматривается вопрос создания умных заводов для интеллектуального транспорта. В настоящее время предпринимаются усилия по развитию интеллектуальных и автономных транспортных средств и так называемых умных городов. Однако этого всего не будет без определенного фундамента, а именно без умных заводов. В настоящее время реконфигурируемые продукты будут большим преимуществом для клиентов, а также большой проблемой для разработчиков производственных систем. Поэтому вопрос о том, как превратить классические обычные фабрики в интеллектуальные, нужно решать уже сегодня. Давление со стороны рынков, требующих более коротких инновационных циклов, более низких цен, более сложных продуктов, повышенной гибкости, индивидуализированного производства или более высокой производительности, неуклонно растет. Если фабрики хотят оставаться конкурентоспособными и сохранять свою долю рынка, они должны адаптироваться к новым требованиям, а также оптимизировать и реконфигурировать производственные процессы.

Список литературы

1. Миронова А. А., Никулин А. Н., Бейсова Р. С., Логинова И. В. Цифровизация обучения бережливое производство на предприятиях на примере АО "НПП «Завод Искра» // Сб. тр. по проблемам дополнительного профессионального образования. 2019. № 36. С. 110–118.
2. Скрипкин Е. Д. Влияние цифровизации и автоматизации на операционный менеджмент и производство на примере ООО «Завод Медсинтез» // Решение задач социального-экономического развития в условиях геополитических изменений : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф., Самара, 01 июня 2020 года. Самара: НИЦ «Аэтерна», 2020. С. 154–156.
3. Автоматизации производства. URL:<http://engcrafts.com/item/1507-avtomatizatsii> (дата обращения: 04.05.2023).
4. Белан Д. Ю., Макашин Д. С. Требования к автоматической идентификации и сбору данных в производстве деталей // Наука молодых – будущее России: сб. науч. ст. 7-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых, Курск, 12–13 декабря 2022 года. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. Том 5. С. 145–149.
5. Хан А. А., Шениязов В. К. Анализ затрат на цифровизацию промышленного производства «Новосибирского механического завода «Искра» // Наука. Технологии. Инновации: Сб. науч. тр. XV Всерос. науч. конф. молодых ученых, посвященной Году науки и технологий в России. Новосибирск, 06–10 декабря 2021 года / Под редакцией Д. О. Соколовой. В 10-ти частях. Часть 7. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. С. 226–230.
6. Долонина Е. А. Аналитическое исследование трансформации бизнес-процессов промышленного предприятия в условиях цифровизации // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 2020. № 6 (85). С. 189–197. DOI 10.21295/2223-5639-2020-6-189-197.
7. Винник У. В., Авдиль Э. Э. Внедрение и влияние цифровизации на развитие промышленного производства // Устойчивость экосистем в условиях цифровой нестабильности : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Симферополь, 30 мая 2022 года. Симферополь: Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, 2022. С. 109–111.
8. Пылаева И. С., Подшивалова М. В. Индустрия 4.0 в автомобильной промышленности: позитивные и негативные эффекты внедрения // Экономика и финансы в технологическом развитии России : материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию со дня рождения Бориса Николаевича Христенко, Челябинск, 27–29 мая 2019 года. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. С. 450–456.
9. Безуглов А. А. Тенденции и возможности развития экономики в условиях цифровизации // Наука XXI века: актуальные направления развития. 2019. № 1-2. С. 162–165.
10. Капустина Л. М., Миколенко А. С., Тимохина Г. С. Оценка цифровой конкурентоспособности промышленных компаний // Цифровые модели и решения. 2022. Т. 1, № 3. С. 1. DOI 10.29141/2782-4934-2022-1-3-1.

Одна модель канала связи забойной телеметрической системы One Model of the Communication Channel of the Downhole Telemetry System

О. В. Стукач¹, И. А. Ершов²

¹Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

O. V. Stukach¹, I. A. Ershov²

¹National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Аннотация. Предложена модель телеметрического скважинного канала связи для случая распространения поля при наличии возмущений. Проведён анализ передачи информационного сигнала с помощью метода связанных мод, основанного на управляемых модах кольцевого диэлектрического проводника. Исходя из оценки среднего затухания и среднего времени распространения сигнала на единицу длины, показана возможность передачи радиоимпульсного сигнала.

Ключевые слова: скважинные измерения, нефтесервис, забойная телесистема, геофизический контроль разработки месторождений, исследования скважин, цифровой двойник месторождения

Abstract. A model of a telemetry downhole communication channel is proposed for the propagation in the disturbances. The analysis of an information signal transfer using the coupled mode method based on the controlled modes of an circular dielectric guide is carried out. Based on the evaluation of the average attenuation and the propagation time of the signal per unit length, the possibility of transmitting a radio pulse signal is shown.

Keywords: borehole measurements, oilfield service, downhole telesystem, geophysical control of oil field, well research, digital twin of the oil field.

I. Введение

Для достижения надёжной работы забойной телесистемы независимо от разреза и глубины необходимо использовать комбинированные каналы связи [1]. Причиной этого является сильная зависимость уровня принимаемого на поверхности сигнала от удельного электрического сопротивления пород [2]. Сильное затухание сигнала для электромагнитного канала и низкая скорость передачи данных для гидроимпульсного заставляет продолжать радиофизическое исследования каналов связи и проектировать новые приёмо-передающие системы [3]. В проектировании забойных телеметрических систем важную роль играет определение и учёт условий распространения волн, так как этими условиями определяется возможность и надёжность передачи данных [4]. В наиболее простом случае моделирование канала может быть связано с объёмной долей и типом углеводородов, присутствующих в пористом пласте. Проводимость канала чувствительна в первую очередь к свойствам породы или к жидкости, заполняющей поры. Породы, пропитанные нефтью, имеют более высокое удельное сопротивление, чем водонасыщенные породы, поскольку связанная вода является проводящей, тогда как нефть является изолятором. С другой стороны, вода имеет высокую диэлектрическую проницаемость, около 80, что намного выше, чем у нефти, диэлектрическая проницаемость которой составляет около двух. Следовательно, удельное сопротивление породы существенно влияет на работу телесистем.

Обработка данных каротажа однородного пласта позволяет вывести простую формулу для проводимости и диэлектрической проницаемости. К сожалению, реальная среда состоит из сложных неоднородностей, которые могут чрезвычайно затруднить интерпретацию результатов каротажных измерений. Для того чтобы оценить влияние сложной окружающей среды, необходимо провести дорогостоящие эксперименты. Альтернативой может быть компьютерное моделирование. В литературе описано множество численных моделей: гибридный метод, согласование режимов, обобщенная модель операторов отражения и передачи и др. [5]. Эти модели сложны, требуют значительного компьютерного времени и значительной последующей обработки.

II. Модель

Наш подход исходит из того, что электромагнитное представление такой структуры, как скважина, лучше соответствует изменению цилиндрической диэлектрической направляющей, в то время как другие модели рассматривают только горизонтальную стратификацию. Чтобы изучить распространение и затухание электромагнитного поля, возбуждаемого магнитным или электрическим источником, размещённым в скважине, наличие нефти считается возмущением диэлектрической проницаемости невозмущенной области. Расширим поле в возмущенной области в терминах продольной и поперечной направляющих мод невозмущенного диэлектрического проводника:

$$\left. \begin{aligned} E_x(r, \varphi, x) &= \frac{\varepsilon(r, \varphi)}{\varepsilon'(r, \varphi)} \sum_i e_{xi}(r, \varphi) [A_i(x)e^{-\delta_i x} + A_{\bar{i}}(x)e^{\delta_i x}], \\ H_x(r, \varphi, x) &= \sum_i h_{xi}(r, \varphi) [A_i(x)e^{-\delta_i x} + A_{\bar{i}}(x)e^{\delta_i x}], \\ E_t(r, \varphi, x) &= \sum_i e_{ti}(r, \varphi) [A_i(x)e^{-\delta_i x} + A_{\bar{i}}(x)e^{\delta_i x}], \\ H_t(r, \varphi, x) &= \sum_i h_{ti}(r, \varphi) [A_i(x)e^{-\delta_i x} + A_{\bar{i}}(x)e^{\delta_i x}]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь A_i , $A_{\bar{i}}$ – амплитуды прямой и обратной i -й моды в невозмущенном диэлектрическом цилиндре, δ_i – комплексная постоянная распространения, ε , ε' – диэлектрические постоянные невозмущенной и возмущенной областей соответственно, e_{xi} , h_{xi} , e_{ti} , h_{ti} – соответственно продольное и поперечное распределение поля. С другой стороны, по теореме Лоренца

$$\begin{aligned} j\omega \iint_S E(r, \varphi, x) E^*(r, \varphi, x) [\varepsilon(r, \varphi) - \varepsilon'(r, \varphi)] ds &= \\ = \frac{d}{dx} \iint_S [E^*(r, \varphi, x) H(r, \varphi, x) - E(r, \varphi, x) H^*(r, \varphi, x)] dx, \end{aligned} \quad (2)$$

где * обозначает комплексное сопряжение, S – участок возмущения. Учитывая ортонормированность между модами в невозмущенной области, подставляя (1) в (2), получаем систему дифференциальных уравнений для неизвестных амплитуд A_i , $A_{\bar{i}}$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA_i(x)}{dx} &= \sum_k [A_{\bar{k}}(x) \theta_{ik} e^{(\delta_k + \delta_i)x} + A_k(x) \theta_{ik}^- e^{(\delta_k - \delta_i)x}] \\ \frac{dA_{\bar{i}}(x)}{dx} &= -\sum_k [A_{\bar{k}}(x) \theta_{ik}^- e^{(\delta_k - \delta_i)x} + A_k(x) \theta_{ik} e^{-(\delta_k + \delta_i)x}] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где θ – коэффициенты связи мод:

$$\left. \begin{aligned} Q_{ik} &= j\omega/2 \iint_S \{ [\varepsilon(r, \varphi) - \varepsilon'(r, \varphi)] e_{ti}(r, \varphi) e_{tk}^*(r, \varphi) + \frac{\varepsilon(r, \varphi)}{\varepsilon'(r, \varphi)} e_{xi}(r, \varphi) e_{xk}^*(r, \varphi) \} ds \\ Q_{ik}^- &= j\omega/2 \iint_S \{ [\varepsilon(r, \varphi) - \varepsilon'(r, \varphi)] e_{ti}(r, \varphi) e_{tk}^*(r, \varphi) - \frac{\varepsilon(r, \varphi)}{\varepsilon'(r, \varphi)} e_{xi}(r, \varphi) e_{xk}^*(r, \varphi) \} ds \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Дифференциальные уравнения (3) решаются с учётом того, что коэффициенты связи (4) постоянны вдоль направления распространения x . Для оценки свойств ослабления и распространения возмущающей области используют два передатчика, работающих поочередно, и два приемника (рис. 1).



Рис. 1. Измерения ослабления

Экспериментально определить амплитуды сигналов можно оцениванием среднего относительного затухания и относительного времени распространения на единицу длины, перемещая приёмник по длине скважины и измеряя расстояние:

$$A_{cp} = \frac{10}{v} \lg \frac{A_{11}A_{12}}{A_{21}A_{22}}, \quad \varphi_{cp} = \frac{\varphi_{11} - \varphi_{21} + \varphi_{12} - \varphi_{22}}{\omega v}, \quad (5)$$

где v – расстояние между приемниками, A_{11}, A_{21} – амплитуды, $\varphi_{11}, \varphi_{21}$ – фазы приемников 1 и 2 соответственно, когда передатчик 1 включен, а передатчик 2 выключен, A_{12}, A_{22} – амплитуды, $\varphi_{12}, \varphi_{22}$ – фазы приемников 1 и 2 соответственно, когда передатчик 1 выключен, а передатчик 2 включен. Для плоской волны, распространяющейся в эквивалентной однородной среде с относительной диэлектрической проницаемостью ε и проводимостью δ , затухание α и время распространения t_r на единицу длины составляют [6]:

$$\Xi = \varepsilon - j \frac{\delta}{\omega \varepsilon_0}, \quad \alpha = \frac{-8,7 \omega \operatorname{Re} \Xi}{c}, \quad t_r = \frac{\operatorname{Im} \Xi}{c}, \quad (6)$$

где c – скорость света в вакууме. Введя в (6) средние значения затухания и времени распространения (5), можно определить условия прохождения телеметрического сигнала через канал, определяя ε и δ . Очевидно, что из-за упрощения этого анализа и допущения о плоской волне, такие данные дают приблизительную информацию, но она может быть полезна для оценки целостности сигнала на трассе распространения, изменения его формы и затухания.

III. Результаты

Оценивалось затухание и время распространения сигнала при перемещении приёмника в скважине. При моделировании считалось, что диэлектрическая проницаемость и проводимость бурового раствора равны соответственно $\varepsilon=88$, $\delta=0,25$ См/м, породы $\varepsilon=10$, $\delta=0,5$ См/м, флюида $\varepsilon=25$, $\delta=0,1$ См/м), радиус скважины $s=0,1$ м, частота несущей $f=200$ МГц. На рис. 2 показан отклик на импульсно-модулированное воздействие с затуханием в трубе. Для рассмотренных характеристик изображены аппроксимирующие огибающие (рис. 3).



Рис. 2. Отклик модели на импульсно-модулированный сигнал с затуханием

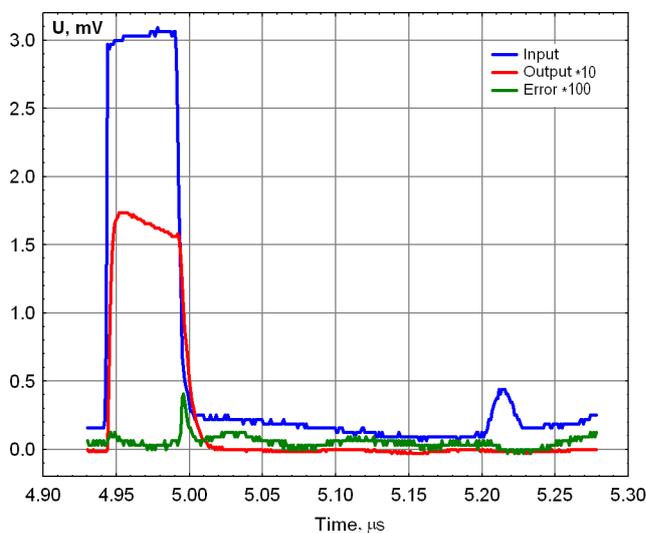


Рис. 3. Сигналы на входе и выходе модели и погрешность моделирования

Затухание, задержка времени распространения и искажение формы сигнала связано с влиянием флюида и горной породы. Когда приёмник оказывается в пределах возмущенной области, измеряется затухание, вызванное возмущением, которое ниже, чем невозмущённое из-за более низкой проводимости в возмущённой области. Для лучшего представления реальных условий в модели следует учитывать функцию диэлектрической проницаемости по оси x . В этом случае пики на заднем фронте имеют меньшую амплитуду. Конкретное значение погрешности моделирования связано с ошибкой измерения параметров, которая заведомо выше 1 дБ. Аналогичные соображения применимы к времени распространения сигнала: когда зонд находится в возмущённой области, более высокая диэлектрическая проницаемость нефти обеспечивает более длительное время распространения, чем в невозмущённой области горных пород. Чем больше протяженность заполненности трубы флюидом, тем больше затухание и тем больше время распространения сигнала, поскольку

большее протяжение создает большую возмущённую область с меньшей проводимостью и более высокой диэлектрической проницаемостью, чем невозмущенная область или горная порода.

III. Выводы

Представлена простая модель распространения электромагнитного излучения в канале связи, образованной нефтяной скважиной. Предложенная модель позволяет характеризовать основные свойства канала телеметрической системы с учётом особенностей вмещающей среды. Проводящая скважина оказывает существенное влияние на форму сигнала, основные искажения и затухание вносятся вмещающей средой. На основе оценки затухания и времени распространения электромагнитного импульса возможна оценка надёжности передачи данных. Подтверждено, что для результатов моделирования справедливы те же закономерности влияния свойств среды, что были ранее установлены при теоретических исследованиях для более сложных моделей. Это означает, что требуется дальнейшее изучение свойств среды и уточненное статистическое моделирование для проектирования приёмо-передающих устройств нефтесервиса.

Источник финансирования. Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-29-00024.

Список литературы

1. Prensky S. Recent advances in LWD/MWD and formation evaluation // World Oil. 2006. No. 3. Pp. 69–75.
2. Adjacent well telemetry system and method for use of the same // European patent no. EP 0918136A1. Publ. 26.05.1999, Bulletin 1999/21.
3. Mirmanov A. B., Stukach O. V. The System Problems in the Microwave Measurement-While-Drilling Telemetry for Controlled Drilling and Modeling in Matlab Simulink //2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986885.
4. Stukach O. V., Mirmanov A. B., Goponenko A. S. Microwave equipment for MWD front-end radiolink in the Borehole pipes // 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk. Pp. 427–430. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040933.
5. Kochumeev V. A., Mirmanov A. B., Pushkarev V. P., Stukach O. V. Problems in design of the new microwave geophysical measuring system // 19th International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications (MIKON). 2012. Vol. 2. Pp. 516–518. DOI: 10.1109/MIKON.2012.6233570.
6. Measurement-while-drilling system / European patent no. EP 0539240B1. Publ. 06.08.1997, Bulletin 1997/32.

УДК 621.396

Влияние компоновки катушек индуктивности на КПД антенного согласующего устройства электрически малой антенны ДКМВ диапазона
Influence of the layout of inductors on the efficiency of the antenna matching device of an electrically small HF antenna

Н. Е. Агарков^{1,2}

¹АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск, Россия

²Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН, г. Омск, Россия

N. E. Agarkov^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russia

²Omsk Science Center SB RAS, Institute of Radiophysics and Physical Electronics, Omsk, Russia

Аннотация. Произведена оценка КПД антенного согласующего устройства электрически малой приземной антенны ДКМВ диапазона, использующего ряд дискретно переключаемых катушек индуктивности с конечной добротностью. Показано, что любая компоновка катушек индуктивности в рамках антенного согласующего устройства приводит к снижению добротности дискретно включаемых элементов относительно собственной добротности катушек за счет дополнительных емкостей печатных (монтажных) проводников, емкости между разомкнутыми контактами реле и активного сопротивления контактов реле. Предлагается рассматривать компоновку согласующей цепи как дополнительную систему антенного согласующего устройства, снижающую его КПД. Отражены результаты макетирования собственного импеданса катушек индуктивности номиналом от 400 нГн до 100 мкГн и входного импеданса дискретных элементов, содержащих эти катушки на печатной плате.

Ключевые слова: электрически малая антенна, согласующее устройство, эффективность, дискретные элементы, катушка индуктивности, компоновка, импеданс.

Abstract. An estimation of the efficiency of the antenna matching device of an electrically small surface antenna of the HF band, using a number of discretely switched inductors with a finite quality factor, has been made. It is shown that any arrangement of inductors within the framework of an antenna matching device leads to a decrease in the quality factor of discretely connected elements relative to the intrinsic quality factor of the coils due to additional capacitances of printed (wiring) conductors, capacitance between open relay contacts and active resistance of relay contacts. It is proposed to consider the layout of the matching circuit as an additional system of the antenna matching device, which reduces its efficiency. The results of prototyping the intrinsic impedance of inductors with a nominal value from 400 nH to 100 μ H and the input impedance of discrete elements containing these coils on a printed circuit board are reflected.

Keywords: electrically small antenna, matching device, efficiency, discrete elements, inductor, layout, impedance.

I. Введение

В настоящее время направление радиосвязи ДКМВ диапазона продолжает активно развиваться [1–6]. По мере совершенствования систем связи данного диапазона в части миниатюризации приемопередающего оборудования, повышения его КПД, надежности, удобства в эксплуатации и уменьшения массы и габаритных размеров, на первое место выходит традиционная проблема габаритных размеров антенно-фидерных устройств. Для реализации высокого коэффициента усиления антенн, разворачиваемых в непосредственной близости от подстилающей поверхности, обладающей диэлектрической проницаемостью (ϵ) и проводимостью (σ), необходимы их размеры, сопоставимые с длиной рабочей волны (200-10 м). Уменьшение размеров антенн ДКМВ диапазона приводит к резкому снижению сопротивления их излучения, росту реактивной части импеданса (т.е. к рассогласованию с входным/выходным каскадом приемопередающей аппаратуры) и сопротивлению потерь в подстилающей поверхности [7-17]. Для согласования таких электрически малых антенн (ЭМА) с приемопередающей аппаратурой используются антенные согласующие устройства (АнСУ). На сегодняшний день наибольшее распространение получили АнСУ с дискретно коммутируемыми элементами, размещаемыми на печатной плате (ПП) или с помощью объемного монтажа (ОМ). Известно, что проводники

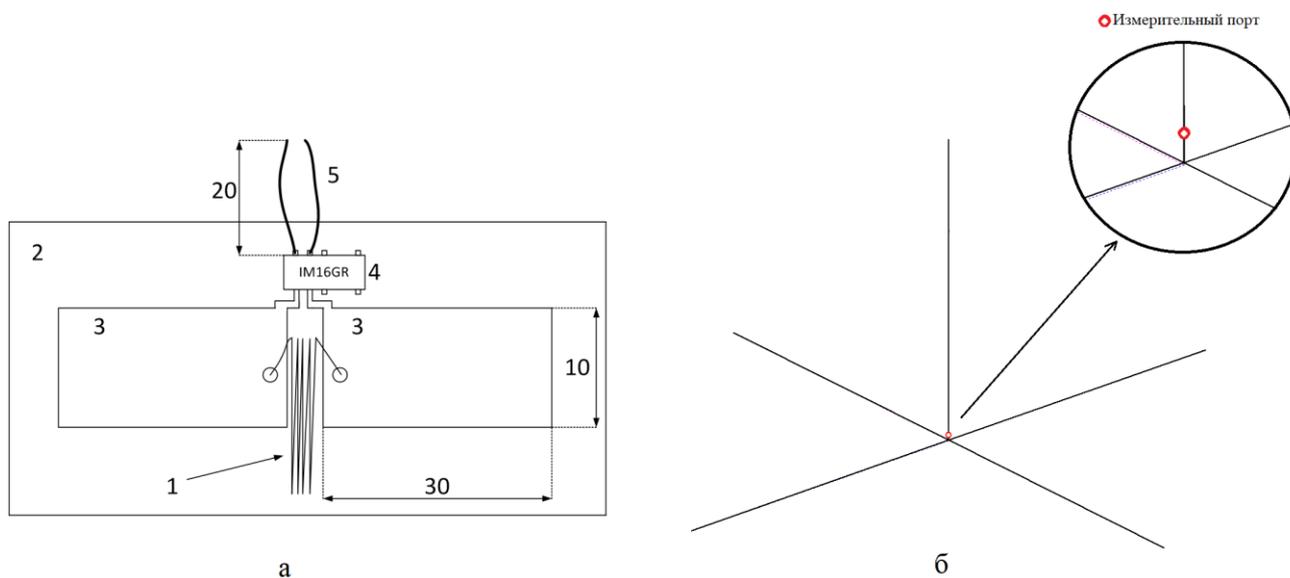
ПП (монтажные проводники при ОМ) и коммутирующие элементы (реле) имеют собственные паразитные параметры – индуктивность, емкость между соседними проводниками цепи, а также на корпус [18, 19]. Величины паразитных параметров зависят как от конструктивного исполнения дискретных элементов, их расположения в АнСУ и обеспечения соединения между собой, так и от количества разрядов элементов АнСУ, т.е. зависят от компоновки АнСУ. В общем случае, уменьшение габаритных размеров антенн ДКМВ диапазона приводит к необходимости увеличения количества разрядов дискретных элементов АнСУ. В данной работе рассматривается АнСУ для ЭМА, обладающей емкостной реактивной частью импеданса в рабочем диапазоне частот, что требует использования катушек индуктивности с конечной добротностью. В ряде исследований было показано влияние паразитных параметров элементов и топологии ПП на результат настройки ЭМА с помощью АнСУ [20-25]. Однако вопрос о снижении КПД АнСУ за счет влияния компоновки согласующей цепи на величину ее добротности, на взгляд автора данной работы, раскрыт не в полной мере.

II. Постановка задачи

С целью раскрытия вопроса о влиянии компоновки катушек индуктивности на КПД АнСУ было проведено макетирование ряда катушек индуктивности (0.4; 0.8; 1.6; 3.2; 6.4; 12.8; 25.6; 51.2; 102.4 мкГн) для оценки их импеданса, как отдельных элементов, так и при их расположении на ПП с реле Axicom IM16GR [19] (с разомкнутыми контактами). Схематическое изображение ПП с реле, использовавшейся для установки всех изготовленных катушек индуктивности показано на рис. 1,а. Принцип действия АнСУ в данной работе был основан на компенсации реактивной части импеданса ЭМА (поскольку активное сопротивление АнСУ определяется наименее добротными его элементами, т.е. катушками индуктивности).

Катушки индуктивности до 3.2 мкГн включительно выполнялись бескаркасными диаметром 30 мм из провода ПЭТВ-2 1.0 мм диаметром. В катушках индуктивности 6.4 и 12.8 мкГн использовался кольцевой магнитопровод диаметром 43 мм (одно кольцо) из карбонильного железа T175-2 и провод ПЭТВ-2 1.0 мм диаметром. В катушках индуктивности с 25.6 до 102.4 мкГн использовался кольцевой магнитопровод (два кольца) из карбонильного железа T175-2 и провод ПЭТВ-2 1,0 мм диаметром. Диаметр бескаркасных катушек индуктивности и катушек, имеющих магнитопровод из карбонильного железа, подбирался путем многократных экспериментов по определению оптимальных соотношений диаметра катушки, толщины проводника катушки и добротности катушки в диапазоне частот.

В качестве объекта согласования была выбрана штыревая антенна длиной 1500 мм с противовесом из четырех перпендикулярных друг другу проводников длиной 1500 мм, показанная на рис. 1,б. Во всем ДКМВ диапазоне такая ЭМА удовлетворяет критерию электрической малости [13-15, 17]. Частотные зависимости импеданса антенны и коэффициента усиления были получены путем электродинамического моделирования антенны в свободно распространяемом программном обеспечении NEC-2 for MMANA, использующем модель подстилающей поверхности Зоммерфельда-Нортонна [26]. Измерительный порт в модели ЭМА был задан проводником длиной 50 мм, расположенным между противовесом и излучателем (рис. 1,б).



1 – катушка индуктивности; 2 – ПП; 3 – полигон на ПП; 4 – реле; 5 – технологические проводники для подключения дискретного элемента к анализатору цепей

Рис. 1. Схематическое изображение дискретного элемента (а) и вид модели штыревой антенны (б)

Материалом проводников ЭМА служило железо, их диаметр был принят равным 3 мм. Модель располагалась в 1 мм над сухой подстилающей поверхностью с параметрами $\epsilon=13$; $\sigma=2$ мСм/м. ЭМА данной конструкции имеют всенаправленную диаграмму направленности в горизонтальной плоскости и широко применяются в качестве антенн носимых радиостанций ДКМВ диапазона [7-9], развертываемых непосредственно на подстилающей поверхности. Несмотря на высокую добротность таких укороченных штыревых антенн, достигающуюся за счет малой собственной емкости, их эффективность в нижней части ДКМВ диапазона очень низка из-за большого сопротивления потерь в подстилающей поверхности и низкого сопротивления излучения. Дополнительное снижение эффективности ЭМА происходит из-за наличия в АнСУ активного сопротивления элементов согласования, прежде всего, катушек индуктивности.

КПД АнСУ в данной работе рассчитывалось как частное от деления активной части импеданса модели ЭМА к суммарному сопротивлению активного сопротивления модели и необходимого для компенсации реактивной части импеданса ЭМА набора катушек индуктивности.

III. Результаты макетирования

Результаты макетирования катушек индуктивности как отдельных элементов, так и установленных на ПП с реле с разомкнутыми контактами, представлены в таблицах 1-9. Результаты получены с помощью векторного анализатора цепей «Обзор» 304/1. В таблице 10 отражены результаты моделирования импеданса штыревой ЭМА (рис. 1,б) и ее коэффициента усиления, а также КПД АнСУ, рассчитанное при использовании импеданса катушек индуктивности без учета их установки на ПП с реле и с учетом, соответственно.

ТАБЛИЦА 1

ИМПЕДАНС КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ 400 НГН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕЙ

Частота, МГц	Собственная характеристика катушки			Характеристика катушки, установленной на ПП с реле (разомкнутые контакты)		
	R, Ом	X, Ом	Q	R, Ом	X, Ом	Q
1.5	0.050	3.75	75	0.090	4.8	53
5	0.090	12.4	138	0.158	15.9	101
10	0.132	24.8	188	0.234	32.0	137
15	0.167	37.3	223	0.314	48.6	155
20	0.200	49.9	250	0.426	66.0	155
25	0.230	62.6	272	0.571	84.3	148
30	0.280	75.5	270	0.757	104.7	138

ТАБЛИЦА 2

ИМПЕДАНС КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ 800 НГН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕЙ

Частота, МГц	Собственная характеристика катушки			Характеристика катушки, установленной на ПП с реле (разомкнутые контакты)		
	R, Ом	X, Ом	Q	R, Ом	X, Ом	Q
1.5	0.070	7.6	109	0.117	8.8	75
5	0.134	25.3	189	0.215	29.4	137
10	0.200	50.6	253	0.329	59.8	182
15	0.258	76.4	296	0.483	92.3	191
20	0.316	102.9	326	0.778	128.3	165
25	0.394	130.3	331	1.200	169.3	141
30	0.493	158.8	322	1.700	218.9	129

ТАБЛИЦА 3
ИМПЕДАНС КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ 1600 НГН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕЙ

Частота, МГц	Собственная характеристика катушки			Характеристика катушки, установленной на ПП с реле (разомкнутые контакты)		
	R, Ом	X, Ом	Q	R, Ом	X, Ом	Q
1.5	0.150	15.2	101	0.210	19.1	91
5	0.294	50.6	172	0.398	64.2	161
10	0.451	101.9	226	0.660	133.4	202
15	0.592	155.4	263	1.280	215.1	168
20	0.759	212.1	279	3.060	320.3	105
25	0.938	273.5	292	7.020	468.5	67
30	1.172	341.7	292	16.500	720.1	44

ТАБЛИЦА 4
ИМПЕДАНС КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ 3200 НГН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕЙ

Частота, МГц	Собственная характеристика катушки			Характеристика катушки, установленной на ПП с реле (разомкнутые контакты)		
	R, Ом	X, Ом	Q	R, Ом	X, Ом	Q
1.5	0.240	30,6	128	0.293	32.3	110
5	0.479	102.1	213	0.600	109.6	183
10	0.768	207.4	270	1.200	235.3	196
15	1.090	320.1	294	3.040	403.2	133
20	1.530	445.2	291	10.300	674.7	66
25	2.060	589.2	286	67.3	1225	18
30	2.740	762.7	278	344	3600	10,5

ТАБЛИЦА 5
ИМПЕДАНС КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ 6400 НГН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕЙ

Частота, МГц	Собственная характеристика катушки			Характеристика катушки, установленной на ПП с реле (разомкнутые контакты)		
	R, Ом	X, Ом	Q	R, Ом	X, Ом	Q
1.5	0.179	58.3	326	0.223	59.8	268
3	0.324	117	361	0.415	121.4	293
5	0.597	198	332	0.810	208.6	258
7	1.000	283	283	1.51	307.5	204
10	1.98	423,6	214	3.88	495.6	128
12	3.08	530	172	7.51	669.2	89
14	4.8	651	136	16.5	915.4	55
16	7.3	793	109	36.1	1310	36
18	11.6	964	83	107.5	2063	19
20	18.4	1178	64	515.6	4130	8

ТАБЛИЦА 6
ИМПЕДАНС КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ 12800 НГН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕЙ

Частота, МГц	Собственная характеристика катушки			Характеристика катушки, установленной на ПП с реле (разомкнутые контакты)		
	R, Ом	X, Ом	Q	R, Ом	X, Ом	Q
1.5	0.33	120	364	0.38	122	321
3	0.66	242	370	0.87	250	287
5	1.37	414	302	2.12	447	211
6	1.87	506	271	3.4	564	166
8	3.43	708	206	8.2	870	106
10	6.07	944	156	22.2	1360	61
12	10.7	1230	115	75.3	2368	31
14	19.2	1615	84	540	5760	10.5
16	36.2	2147	59	7700	-19500	-

ТАБЛИЦА 7
ИМПЕДАНС КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ 25600 НГН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕЙ

Частота, МГц	Собственная характеристика катушки			Характеристика катушки, установленной на ПП с реле (разомкнутые контакты)		
	R, Ом	X, Ом	Q	R, Ом	X, Ом	Q
1.5	0.62	238	384	0.74	244	330
3	1.66	495	298	2.5	524	210
4	2.84	688	242	4.95	757	153
5	4.76	910	191	10.2	1062	104
6	7.85	1180	150	23.3	1500	64
7	13.0	1540	118	51.7	2209	43
8	22.8	1965	86	149	3634	24
9	42.0	2608	62	843	8165	9.5
10	84.2	3631	43	33000	-36100	-

ТАБЛИЦА 8
ИМПЕДАНС КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ 51200 НГН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕЙ

Частота, МГц	Собственная характеристика катушки			Характеристика катушки, установленной на ПП с реле (разомкнутые контакты)		
	R, Ом	X, Ом	Q	R, Ом	X, Ом	Q
1.5	1.71	490	287	2.25	503	224
2	3.03	676	223	4.42	713	161
2.5	4.50	885	197	7.04	930	132
3	6.74	1120	166	12.61	1230	98
3.5	10.3	1414	137	24.20	1634	68
4	16.40	1770	108	52.30	2140	41
4.5	25.20	2239	89	84.91	2802	33
5	45.2	2884	64	173.0	3841	22

ТАБЛИЦА 9
ИМПЕДАНС КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ 102400 НГН И ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕЙ

Частота, МГц	Собственная характеристика катушки			Характеристика катушки, установленной на ПП с реле (разомкнутые контакты)		
	R, Ом	X, Ом	Q	R, Ом	X, Ом	Q
1.5	4.8	909	189	7.5	954	127
2	8.3	1258	152	14.6	1380	95
2.5	14.7	1654	113	30.0	1930	64
3.0	23.3	2120	91	57.0	2713	48
3.5	37.0	2692	73	128	3975	31

ТАБЛИЦА 10
ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШТЫРЕВОЙ АНТЕННЫ ДЛИНОЙ 1500 ММ И ЗНАЧЕНИЯ КПД АНСУ

Частота, МГц	R, Ом	X, Ом	Кэффиц. усиления ЭМА, дБи	Инд-сть компенсации, мкГн	Набор катушек для компенсации без учета их установки на ПП с реле	КПД АнСУ, %	Набор катушек для компенсации при их установке на ПП с реле	КПД АнСУ, %
1.5	45.9	-7412	-32.4	786.4	-	-	-	-
2	40.9	-5435	-29.7	432.5	-	-	-	-
2,5	35.1	-4273	-27.4	272.0	102; 102; 51; 3.2	50.6	102; 102; 25.6	36.1
3	29.3	-3534	-25.2	187.5	102; 51.2; 12.8; 3.2	48.6	102; 25.6; 12.8; 3.2	32.6
4	23.6	-2613	-21.4	104.0	51.2; 25.6; 6.4	54.6	51.2; 12.8; 3.2	30.3
5	18.3	-2117	-18.2	67.4	25.6; 25.6; 6.4; 3.2	63.3	25.6; 25.6	47.3
6	12.5	-1761	-15.5	46.7	25.6; 12.8; 1.6	55.5	25.6; 6.4	33.8
7	10.9	-1496	-13.3	34.0	25.6	45.6	12.8; 6.4; 3.2; 1.6; 0.8; 0.4	57.0
8	9.6	-1297	-11.5	25.8	12.8; 6.4; 3.2; 1.6; 0.8	60.5	12.8; 6.4	46.2
9	8.4	-1154	-9.1	20.4	12.8; 6.4	59.2	12.8	37.5
10	7.6	-1030	-8.4	16.4	12.8; 0.8; 0.4	54.4	6.4; 3.2; 1.6; 1.6; 0.4	52.3
12	6.8	-823	-6.8	10.9	6.4; 3.2; 0.8	62.2	6.4; 1.6	44.4
14	6.6	-687	-5.5	7.8	6.4; 0.4	56.9	3.2; 1.6; 0.8; 0.4	58.9
16	6.7	-584	-4.4	5.8	3.2; 1.6; 0.8	77.0	3.2; 0.8; 0.8	59.8
18	7.1	-523	-3.6	4.6	3.2; 1.6	80.7	3.2	54.2
20	7.7	-451	-2.9	3.6	3.2	83.7	1.6; 0.8	66.6
25	9.6	-319	-1.8	2.0	1.6; 0.4	89.7	0.8; 0.4; 0.2; 0.1; 0.05	82.8
30	12.3	-216	-1.1	1.1	0.8; 0.4	93.9	0.8	87.9

Анализ данных таблиц 1-9 показывает, что установка катушки индуктивности на ПП с реле всегда приводит к снижению добротности дискретного элемента с этой катушкой за счет возникновения дополнительной емкости между проводниками ПП, между разомкнутыми контактами реле, между технологическими выводами ПП (необходимых для подключения ее к анализатору цепей) и повышения емкости самой катушки индуктивности за счет ее размещения над ПП. Вышеперечисленные емкости обладают различной добротностью, самой низкой из которых обладает емкость между выводами полигона, размещенного на ПП.

Значения КПД АнСУ, представленные в таблице 10, позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, компоновка катушек индуктивности влияет на набор дискретных элементов с этими катушками, необходимый для компенсации реактивного сопротивления ЭМА. Во-вторых, на всех частотах настройки (за исключением 7

и 14 МГц) КПД АнСУ с учетом установки катушек на ПП с реле оказывается значительно ниже значений, получаемых при учете только собственной добротности катушек индуктивности. На частотах 7 и 14 МГц из-за нелинейности частотной зависимости реактивной части импеданса катушек КПД АнСУ с набором дискретных элементов оказывается выше КПД АнСУ с набором, собственно, катушек индуктивности. В-третьих, на частотах 5, 10 и 16 МГц для настройки ЭМА требуются дополнительные разряды дискретных элементов, которые уже единожды задействованы в согласующей цепи. Это также происходит из-за наличия нелинейности частотной зависимости реактивной части импеданса катушек и дискретных элементов на их основе. В-четвертых, достаточно высокий КПД АнСУ в диапазоне частот от 2,5 до 7-8 МГц достигается за счет очень большого сопротивления потерь в подстилающей поверхности и крайне низкого коэффициента усиления ЭМА. При расположении ЭМА над хорошо проводящей почвой КПД АнСУ ее активное сопротивление в диапазоне частот от 2,5 до, примерно, 6-7 МГц снизится в 3-4 раза, настолько же упадет и КПД АнСУ.

IV. Заключение

В работе рассмотрено влияние компоновки катушек индуктивности на КПД АнСУ ЭМА с емкостным характером реактивной части импеданса. Показано, что расположение катушек индуктивности в согласующей цепи АнСУ, включающей в себя проводники ПП, реле и дополнительные технологические выводы для подключения к анализатору цепей значительно снижает добротность дискретных элементов по сравнению с собственной добротностью этих же катушек. Следовательно, для повышения точности расчета реальных частотных характеристик ЭМА (активной части импеданса и коэффициента усиления), согласуемых с помощью АнСУ необходимо всесторонне учитывать влияние компоновки катушек индуктивности.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

Список литературы

1. Головин О. В., Простов С. П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. С. 3–29.
2. Johnson E. E. Staring link establishment for high-frequency radio // 2015 IEEE Military Communications Conference. 2015. Pp. 1433–1438. DOI: 10.1109/MILCOM.2015.7357646.
3. Johnson E. E. Wideband ALE – the next generation of HF // Nordic HF Radio Conference HF '16, Fårö, Sweden. Aug. 2016. Pp. 9.1.1-9.1.18.
4. 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.
5. Официальный сайт специальные радиосистемы. URL: [https:// www.radioscanner.ru/files/systems/file20434/](https://www.radioscanner.ru/files/systems/file20434/) (дата обращения 02.03.2023).
6. Волкомирская Л. Б., Гулевич О. А., Крашенинников И. В., Кривошеев Н. В., Резников А. Е., Сахтеров В. И. Результаты экспериментов в средних широтах с использованием широкополосных коротковолновых сигналов для связи и диагностики структуры ионосферы // Электронный журнал «Инженерный вестник Дона». 2019. № 1 (52). С. 1–11.
7. Гвоздев И. Н., Муравьев Ю. К., Серков В. П., Чернолес В. П. Характеристики антенн радиосистем связи. Ленинград: Изд. ВАС, 1978. 231 с.
8. Мешалкин В. А., Сосунов В. В., Филиппов В. В. Поля и волны в задачах разведзащищенности и радиоэлектронной защиты систем связи. С.-Пб.: ВАС, 1993. 321 с.
9. Верещагин Е. М. Антенны и распространение радиоволн. М.: Воениздат, 1964. С. 67–72, 81–89.
10. Гвоздев И. Н., Муравьев Ю. К., Серков В. П., Чернолес В. П. Характеристики антенн радиосистем связи. Ленинград: Изд. ВАС, 1978. С. 165, 166, 168, 182, 183.
11. Щелкунов С., Фриис Г. Антенны. Теория и практика / пер. с англ. под ред. Л. Д. Бахраха. М.: Госэнергоиздат, 1955. С.325–328.
12. Лавров Г. А., Князев А. С. Приземные и подземные антенны. М.: Советское радио, 1965. С. 369–384.
13. Hansen R.C., Collin R.E. Small Antenna Handbook. John Wiley and Sons, 2011. 360 p.
14. Nikkhah N., Zakeri B., Abedi H. Extremely electrically small MF/HF antenna // IET Microw. Antennas Propag. Jan. 2020. Vol. 14, is. 1. Pp. 88–92. DOI: 10.1049/iet-map.2019.0200.
15. Fujimoto K. F., Morishita H. Modern Small Antennas. Cambridge University Press, 2013. 488 p.
16. Беличенко В. П. Электрически малые антенны: хронология, решенные задачи, новые проблемы и идеи // Актуальные проблемы радиофизики: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 56–61.

17. Слюсар В. 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги // Электроника: наука, технология, бизнес. 2006. № 7 (73). С. 10–19.
18. Волин М. Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. М.: «Радио и связь», 1981. 296 с.
19. Официальный сайт Farnell. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/64633.pdf> (дата обращения 02.03.2023).
20. Муравьев Ю. К., Серков В. П. Определение добротности антенных устройств // Вопросы расчета радиолоний и антенных устройств. Изд. ВАС, 1981. С. 43–50.
21. Борийчук Г. И., Сергеев В. М. Расчет П-образной согласующе-фильтрующей цепи на дискретных элементах // Вопросы расчета и проектирования антенн и радиолоний. Изд. ВАС, 1982. С. 91–95.
22. Борийчук Г. И., Юдин А. А., Селягин М. А., Сергеев В. М. Синтез антенных согласующих устройств с вычислительными алгоритмами настройки // Вопросы расчета и проектирования антенн и радиолоний. Л.: изд. ВАС, 1985. С. 138–145.
23. Ковалевич Д. А. Способ автоматического согласования антенны и выходных каскадов передатчика // Доклады БГУИР. 2021. №19 (3). С. 31–39.
24. Петухов Н. А. К вопросу проектирования антенно-согласующих устройств // Проектирование и технология электронных средств. 2012. № 4. С. 28–30.
25. Хлопушин И. Ю., Маслова Н. С. Особенности проектирования антенных согласующих устройств ДКМВ диапазона на отечественной элементной базе // Радиотехника, электроника и связь: сб. докл. V Междунар. науч.-техн. конф. Омск: ОНИИП, 2019. С. 128–133.
26. Справочник по распространению земных волн. 2014. С. 12–15. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-59-2014-PDF-R.pdf (дата обращения: 05.11.2022).

УДК 378:004

Исследование поверхностного фазового перехода в антиферромагнитных пленках с помощью компьютерного моделирования

Research on the surface phase transition of antiferromagnetic films by computer simulation

Е. В. Богданова, С. В. Белим

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

E. V. Bogdanova, S. V. Belim

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье представлены результаты компьютерного моделирования фазовых переходов в тонких антиферромагнитных пленках. Для описания системы применялась модель Изинга. Для исследования системы использовался алгоритм Метрополиса. В статье рассматриваются пленки различной толщины и различных линейных размеров, описаны случаи различных поверхностных энергий. Определена температура Нееля антиферромагнитного фазового перехода в основном объеме системы и температура поверхностного фазового перехода. Построена фазовая диаграмма системы и определена зависимость вида фазовой диаграммы от толщины пленки. Определены типы фазовых переходов.

Ключевые слова: антиферромагнетик, тонкие пленки, модель Изинга, фазовые переходы.

Abstract. The paper presents the results of the computer simulation of phase transitions in thin antiferromagnetic films. The Ising model was used to describe the system. The Metropolis algorithm was used to study the system. Films of different thicknesses and linear sizes are considered in the paper, and the cases of different surface energies are described. The Neel temperature of the antiferromagnetic phase transition in the main volume of the system and the temperature of the surface phase transition are determined. A phase diagram of the system is constructed and the dependence of the phase diagram type on the film thickness is determined. The types of phase transitions are determined.

Keywords: antiferromagnetics, thin films, Ising model, phase transitions.

I. Введение

Поверхностный магнетизм играет важную роль в многослойных системах магнитных материалов. Антиферромагнитные материалы используются в качестве подложки для ферромагнитных пленок в устройствах спинтроники [1, 2]. Поверхность антиферромагнитной подложки обеспечивает стабилизацию состояния ферромагнитной пленки. Поэтому изучение поверхностных явлений в антиферромагнетиках является важнейшей задачей.

Поверхностные явления достаточно подробно изучены для ферромагнитных систем [3-5]. Поверхностный магнетизм появляется в ферромагнитных полубесконечных системах, если поверхностная энергия обменного взаимодействия между спинами превышает обменное взаимодействие в объеме, по крайней мере, в 1,55 раза. Такое рассогласование связано с изменением расстояния между атомами. Например, для Gd [6] межатомное расстояние в объеме кристалла составляет 3,52 Å, тогда как на поверхности - 3,64 Å. Как следствие, значения обменных интегралов на поверхности и в объеме кристалла отличаются в 1,2 раза.

Поверхностный магнетизм в антиферромагнетиках изучен гораздо меньше. Основные исследования сосредоточены на наклоне поверхности одной из подрешеток под действием магнитного поля. Это явление было названо спин-флоп переходом [7,8]. Однако значительный интерес представляет поверхностный фазовый переход под действием температуры и условия его наблюдения.

II. Постановка задачи

Поверхностный фазовый переход, присутствующий в полубесконечных системах, может не наблюдаться в тонких пленках. В пленке, состоящей из одного или двух атомных слоев, из-за отсутствия других спиновых слоев, кроме поверхностных, поверхностный фазовый переход тождественен обычному фазовому переходу. При увеличении числа атомных слоев пленки должно происходить разделение поверхностного фазового перехода и объемного фазового перехода при больших значениях поверхностной энергии. Появление поверхностного фазового перехода обусловлено тем, что в пределе увеличения толщины пленка переходит в полубесконечную систему, в которой наблюдается существование фазы с упорядоченными на поверхности спинами и неупорядоченными спинами в основном объеме. Должна существовать критическая толщина тонкой пленки, начиная с которой в системе происходит поверхностный фазовый переход. Определение этой толщины является актуальной задачей.

Влияние поверхностного слоя спинов на основной объем убывает по экспоненциальному закону от расстояния до поверхности. Для полубесконечных систем такое влияние не существенно, тогда как для тонких пленок этим эффектом пренебрегать нельзя, ведь расстояние, на котором влияние поверхностного упорядочивания становится незначительным, соизмеримо с толщиной пленки. Поэтому актуальной является задача определения положения точки специального фазового перехода на фазовой диаграмме системы в зависимости от толщины пленки.

III. Теория

В рассматриваемой модели тонкая пленка представляет собой набор атомных слоев с кубической кристаллической решеткой. Каждому атому с номером i сопоставляется значение спина S_i . Модель описывается моделью Изинга, поэтому значение спина S_i принимает только значения $+1/2$ или $-1/2$. Взаимодействие между ближайшими соседями носит антиферромагнитный характер. Константу обменного взаимодействия в объеме системы обозначим J_0 , на поверхности системы - J_s . Поверхностный фазовый переход возможен в случае $J_s > J_0$. При компьютерном моделировании удобнее пользоваться относительными величинами, поэтому вводится отношение констант обменного взаимодействия $R = J_s/J_0$ ($R \geq 1$).

Гамильтониан модели Изинга вычисляется как сумма энергий парных взаимодействий спинов:

$$H = J_0 \sum_{\langle i,j \rangle} S_i S_j + J_s \sum_{\langle i,j \rangle} S_i S_j \quad (1)$$

При компьютерном моделировании тонкая пленка располагалась параллельно плоскости OXY . Поверхности пленки имели уравнения $z = 0$ и $z = D - 1$. D - толщина пленки, определяемая количеством моноатомных слоев. Исследуемая система имела размеры $L \times L \times D$. L - количество атомов вдоль осей OX и OY . Для изучения свойств бесконечной пленки на систему накладывались периодические граничные условия вдоль осей OX и OY .

Для исследования возможности появления поверхностного антиферромагнетизма тонкие пленки рассматривались как три взаимодействующие подсистемы. Две подсистемы представляли собой свободные поверхности, то есть моноатомные слои, ограничивающие пленку. Третьей системой было множество спинов в объеме пленки без двух крайних слоев. Первая и вторая системы расположены симметрично и демонстрируют одинаковое поведение при изменении температуры системы.

Для описания процессов упорядочивания спинов в объеме системы вводился антиферромагнитный параметр порядка m_a , который вычислялся как разность намагниченностей двух подрешеток (четной (*even*) и нечетной (*odd*)), сдвинутых относительно друг друга на постоянную решетки вдоль осей OX , OY и OZ . Для характеристики поверхностного упорядочивания спинов вводился аналогичный антиферромагнитный поверхностный параметр порядка m_s

$$m_a = \frac{\left(\sum_{\text{even}} S_i - \sum_{\text{odd}} S_i \right)}{L^2(D-2)}, \quad m_s = \frac{\left(\sum_{\text{even}_S} S_i - \sum_{\text{odd}_S} S_i \right)}{L^2} \quad (2)$$

Для подробного описания фазовых переходов в тонких пленках было использовано несколько параметров. Магнитная восприимчивость подрешеток системы для основного объема χ_a и поверхности χ_s :

$$\chi_a = \frac{\partial m_a}{\partial h} = L^2(D-2) \left(\langle m_a^2 \rangle - \langle m_a \rangle^2 \right) / T, \quad \chi_s = \frac{\partial m_s}{\partial h} = L^2 \left(\langle m_s^2 \rangle - \langle m_s \rangle^2 \right) / T \quad (3)$$

Теплоемкость основного объема C и свободной поверхности C_s

$$C = \frac{\partial E_a}{\partial T} = L^2(D-2) \left(\langle E_a^2 \rangle - \langle E_a \rangle^2 \right) / T, \quad C_s = \frac{\partial E_s}{\partial T} = L^2 \left(\langle E_s^2 \rangle - \langle E_s \rangle^2 \right) / T \quad (4)$$

Кумулянты Биндера четвертого порядка для обоих параметров порядка и для энергии системы:

$$U_a = 1 - \frac{\langle m_a^4 \rangle}{3 \langle m_a^2 \rangle^2}, \quad U_s = 1 - \frac{\langle m_s^4 \rangle}{3 \langle m_s^2 \rangle^2} \quad (5)$$

$$V_a = 1 - \frac{\langle E_a^4 \rangle}{3 \langle E_a^2 \rangle^2}, \quad V_s = 1 - \frac{\langle E_s^4 \rangle}{3 \langle E_s^2 \rangle^2} \quad (6)$$

Все эти четыре вида термодинамических параметров могут быть использованы для определения температуры фазового перехода.

IV. Результаты экспериментов

Компьютерный эксперимент проводился для антиферромагнитных пленок толщиной $4 \leq D \leq 16$ слоев с шагом $\Delta D = 2$. Линейные размеры системы изменялись $16 \leq L \leq 64$ с шагом $\Delta L = 16$. Отношение констант обменного взаимодействия изменялось от $R = 1.0$ до $R = 3.0$ с шагом $\Delta R = 0.1$. Это отношение влияет на поверхностную энергию системы, которая складывается из энергии взаимодействия поверхностных спинов между собой и взаимодействия поверхностных спинов со спинами первого подповерхностного слоя. Для всех значений параметров вычислялась температура Нееля T_N антиферромагнитного фазового перехода в основном объеме системы и температура поверхностного фазового перехода T_s . После этого строились фазовые диаграммы пленок различной толщины D при различных параметрах R . Фазовые диаграммы существенно зависят от толщины пленки. Эта зависимость связана с относительным размером основного объема пленки и поверхностного слоя.

1. Пленки толщиной $D = 4$ и $D = 6$

Для пленок толщиной $D = 4$ размеры основного объема совпадают с размерами поверхностного слоя, для $D = 6$ размеры основного объема превышают в два раза размеры поверхностного слоя. В связи с этим температура для поверхностного фазового перехода T_s совпадает с температурой Нееля в основном объеме T_N . Эти две температуры достаточно четко локализируются по кумулянтам Биндера для параметров порядка.

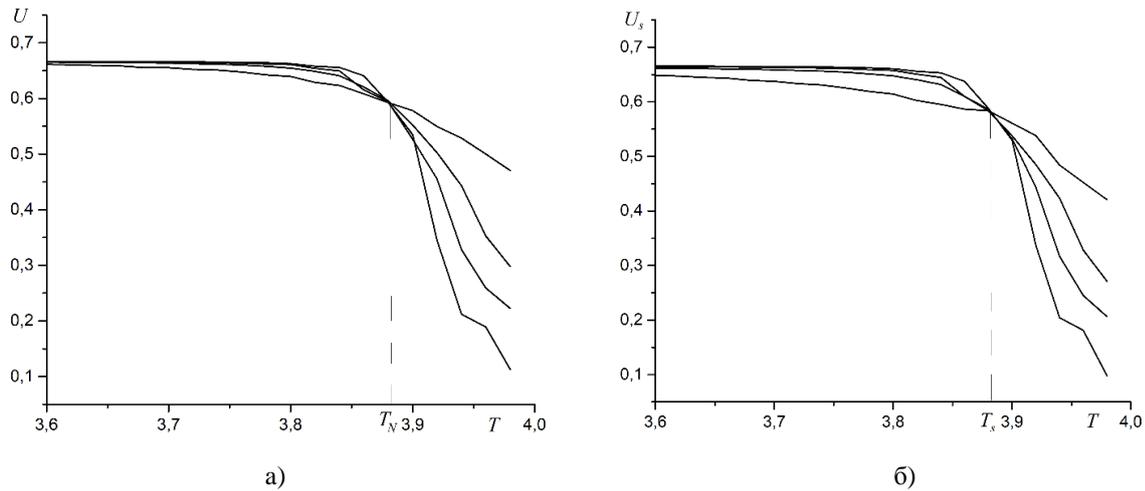


Рис. 1. Зависимость кумулянтов Биндера от температуры для пленки толщиной $D = 4$.

а) U при $R = 1.0$, б) U_s при $R = 1.0$.

Из этих графиков видно, что температуры поверхностного и объемного фазовых переходов совпадают, поэтому можно говорить о единой температуре фазового перехода T_N в таких пленках. Аналогичные результаты были получены и из исследования графиков других термодинамических функций.

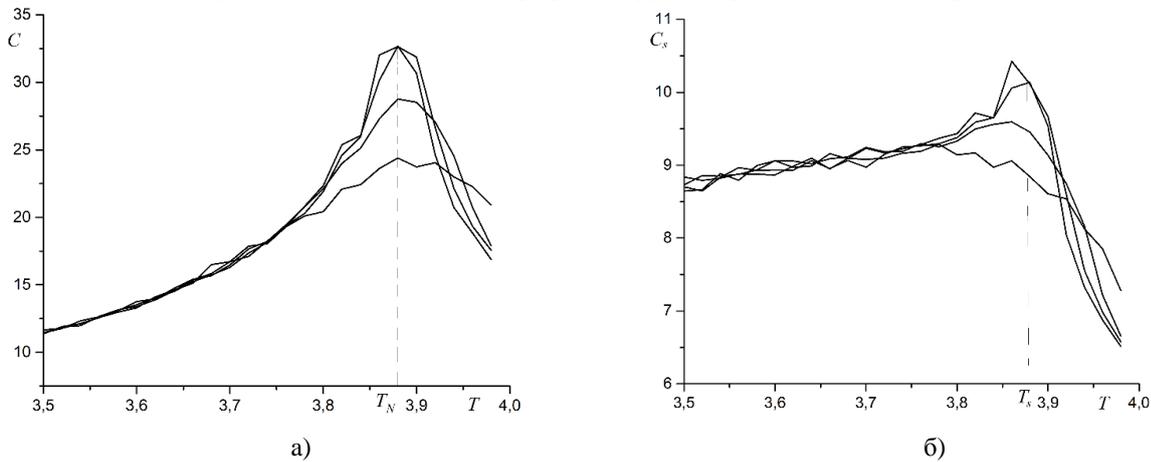


Рис. 2. Зависимость теплоемкости от температуры для пленки толщиной $D = 4$.

а) C при $R = 1.0$, б) C_s при $R = 1.0$.

Были построены графики зависимости температуры фазового перехода T_N от отношения констант обменного взаимодействия. При значениях $R < 1.5$ температура фазового перехода в пленке толщиной $D = 6$ выше, чем в пленке толщиной $D = 4$. Эта закономерность согласуется с известным фактом о том, что в двумерных системах температура фазового перехода ниже, чем в трехмерных. Пленки занимают промежуточное положение между трехмерными и двумерными системами. Температура фазового перехода в пленке растет с увеличением толщины пленки. Для обеих пленок температура растет с увеличением поверхностной константы обменного взаимодействия. Рост температуры обусловлен увеличением энергии взаимодействия между спинами. Для переворота одного спина требуется большая энергия теплового движения. Из графика также видно, что температура Нееля для пленки толщиной $D = 6$ растет медленнее, чем для пленок толщиной $D = 4$. Рост температуры при изменении R связан с увеличением средней энергии взаимодействия, приходящейся на один спин. При $R > 1.5$ температура Нееля для пленок толщиной $D = 6$ становится меньше, чем для $D = 4$. Это обусловлено тем, что скорость роста обратно пропорциональна толщине пленки. Следует учесть, что оценка величины температуры по среднему значению энергии на спин не является точной, а зависимость температуры от отношения констант обменного взаимодействия отличается от линейной.

2. Пленки толщиной $D > 6$

В пленках $D \geq 8$ существует критическое значение отношения констант обменного взаимодействия R_c , выше и ниже которого поведение системы является различным. При $R \leq R_c$ температуры поверхностного и объемного фазовых переходов совпадают ($T_s = T_N$). Если $R > R_c$, то антиферромагнитное упорядочивание на поверхности пленки происходит при более высокой температуре, чем в объеме пленки ($T_s > T_N$). При понижении

температуры системы сначала происходит антиферромагнитное упорядочивание в моноатомном поверхностном слое, а потом, при более низкой температуре, упорядочиваются спины в объеме пленки. То есть, при $R > R_c$ в системе происходит два фазовых перехода: при температуре T_s поверхностный (surface) фазовый переход, при температуре T_N экстраординарный (extraordinary) фазовый переход. При $R \leq R_c$ в системе наблюдается только один обычный фазовый переход при температуре T_N . Температура поверхностного фазового перехода растет с увеличением параметра R , то есть поверхностной константы обменного взаимодействия. Таким образом, на фазовой диаграмме системы присутствует две линии фазовых переходов второго рода и три фазы системы (рисунок 3). Эти три линии фазовых переходов пересекаются в одной точке (трикритическая точка). Фазовый переход в трикритической точке принято называть специальным (special phase transition). Положение точки специального фазового перехода на фазовой диаграмме определяется значением R_c . Как показал компьютерный эксперимент R_c зависит от толщины пленки D .

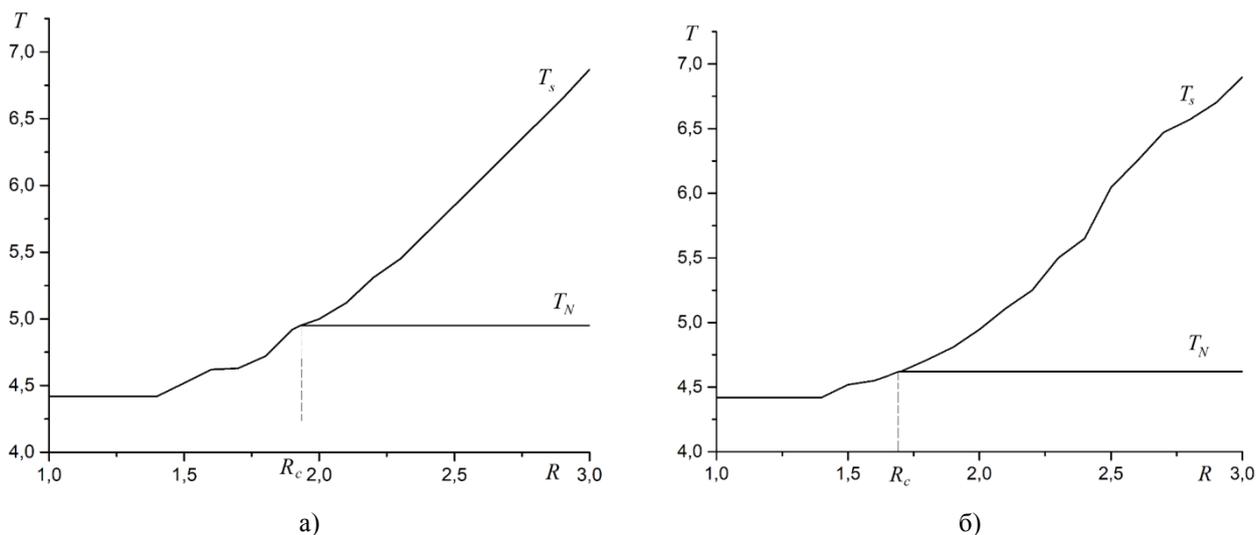


Рис. 3. Фазовая диаграмма для антиферромагнитной пленки толщиной: а) $D = 10$, б) $D = 16$.

Расчеты показали, что для всех значений отношения констант обменного взаимодействия R и всех значений толщины пленки D экстраординарный фазовый переход является фазовым переходом второго рода.

V. Обсуждение результатов

Компьютерное моделирование показало, что в сверхтонких антиферромагнитных пленках не происходит поверхностный фазовый переход. Упорядочивание спинов на поверхности и в основном объеме системы происходит при одной и той же температуре. В тоже время с увеличением поверхностной энергии обменного взаимодействия спинов растет и температура фазового перехода. При увеличении толщины пленки скорость роста температуры Нееля уменьшается. Если толщина пленок превышает некоторый предел, то поверхностный фазовый переход может происходить при температурах выше температуры обычного фазового перехода. На фазовой диаграмме системы присутствует три фазы, связанные с упорядочиванием спинов на поверхности и в основном объеме системы. В случае, когда отношение поверхностной энергии обменного взаимодействия превышает некоторое пороговое значение, происходит разделение объемного и поверхностного фазовых переходов происходит. После перехода поверхностного слоя в антиферромагнитную фазу основной объем системы упорядочивается при более низкой температуре в результате экстраординарного фазового перехода, который является фазовым переходом второго рода. Упорядоченные спины поверхности играют роль внешнего поля, сопряженного антиферромагнитному параметру порядка основной системы и приводят к размытию фазового перехода. Если в пленке происходит поверхностный фазовый переход, то на фазовой диаграмме присутствует трикритическая точка специального фазового перехода, в которой пересекается три линии фазовых переходов второго рода. Положение точки определяется критическим значением отношения констант обменного взаимодействия, которое зависит от толщины пленки.

VI. Выводы и заключение

На основе исследования критического поведения тонких антиферромагнитных пленок можно сделать следующие выводы:

1. В сверхтонких антиферромагнитных пленках не происходит поверхностный фазовый переход.

2. Если толщина пленок превышает некоторый предел, то поверхностный фазовый переход может происходить при температурах выше температуры обычного фазового перехода.

3. После перехода поверхностного слоя в антиферромагнитную фазу основной объем системы упорядочивается при более низкой температуре в результате экстраординарного фазового перехода. Экстраординарный переход является фазовым переходом второго рода.

4. Для эпитаксиальных антиферромагнитных пленок с толщиной более 6 моноатомных слоев на фазовой диаграмме присутствует трикритическая точка специального фазового перехода, в которой пересекается три линии фазовых переходов второго рода. Положение точки определяется критическим значением отношения констант обменного взаимодействия. Температура специального фазового перехода убывает по нелинейному закону с ростом толщины пленки и стремится к значению, характерному для полуограниченных систем.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00108.

Список литературы

1. Chappert C., Fert A., Van Dau N. The emergence of spin electronics in data storage // *Nature Mater.* 2007. Vol. 6. Pp. 813–823.
2. Meinert M., Boker B., Graulich D., Dunz M. Large exchange bias in polycrystalline MnN/CoFe bilayers at room temperature // *Phys. Rev. B.* 2015. Vol. 92. P. 144408.
3. Belim S. V., Koval T. A. Computer Simulation of Surface Phase Transitions in Semi-Infinite Ising Magnets // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2015. Vol. 9, no. 6. Pp. 1130–1136.
4. Diehl H. W. The Theory of Boundary Critical Phenomena // *Int. J. Mod. Phys.* 1997. B11. Pp. 3503–3523.
5. Lubensky T. C., Rubin H. Critical phenomena in semi-infinite systems. II. Mean-field theory // *Phys. Rev.* 1975. B 12. Pp. 3885–3901.
6. Lin C.-Yu., Li J.-L., Hsieh Y.-H. [et al]. Magnetic Interaction between Surface-Engineered Rare-Earth Atomic Spins // *Phys. Rev.* 2012. X 2. P. 021012.
7. Wang R. W., Mills D. L., Fullerton E. E., Mattson J. E., Bader S. D. Surface spin-flop transition in Fe/Cr(211) superlattices: Experiment and theory // *Phys. Rev. Lett.* 1994. 72. P. 920.
8. Rössler U. K., Bogdanov A. N. Magnetic phases and reorientation transitions in antiferromagnetically coupled multilayers // *Phys. Rev.* 2004. B 69. P. 184420.

УДК 537.87

Диэлектрические характеристики образцов почв, отличающихся гранулометрическим составом, в широком диапазоне частот
The dielectrical characteristic of soil's with the differ partical size distribution over a wide frequency range

С. А. Варнаков, А. С. Ященко, С. В. Кривальцевич
Омский научный центр СО РАН (ИРФЭ), г. Омск, Россия

S. A. Varnakov, A. S. Yashchenko, S. V. Krivaltsevich
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics), Omsk, Russia

Аннотация. Приведены данные о диэлектрической проницаемости образцов почв умеренной климатической зоны, отличающихся гранулометрическим составом. Определены общие закономерности влияния частоты, влажности и гранулометрического состава на значения комплексной диэлектрической проницаемости. Полученные зависимости могут найти применение при оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности при решении прикладных задач радиофизики излучения и распространения радиоволн.

Ключевые слова: подстилающая поверхность, комплексная диэлектрическая проницаемость

Abstract. The permittivity data of several soil's types sampling in the temperate climate zone, which differ in particle size distribution, are presented. The general regularities of the effect of frequency, moisture, and particle size distribution on the values of the complex permittivity are determined. These dependences can be use in assessing the radiophysical characteristics of the underlying surface in applied problems of radiophysics of radiation and propagation of radio waves.

Keywords: underlying surface, complex dielectric permittivity.

I. Введение

Решение прикладных задач распространения радиоволн в естественных природных условиях с приемлемой точностью возможно лишь при наличии априорных данных о состоянии окружающей среды: атмосферы, ионосферы, подстилающей поверхности, растительности и т.д. В частном случае достоверная и актуальная информация о диэлектрических характеристиках подстилающей поверхности находит применение при прогнозировании состояния нижней границы волновода «Земля-ионосфера» и оценке импедансных и направленных характеристик приземных антенн. Оценить комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) подстилающей поверхности можно либо с помощью диэлектрических моделей дисперсных смесей, либо по результатам прямых измерений.

На данный момент, теория диэлектрической проницаемости сред создана лишь для относительно простых случаев. Так, значения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) пресной воды могут быть рассчитаны по модели Дебая [1]. Теория диэлектрической проницаемости более сложных структур, например, дисперсных смесей (в частности, грунтов), еще не создана, а известные в настоящее время модели КДП влажных грунтов разработаны по эмпирическим данным, полученным в лабораторных условиях. Так, Международный союз электросвязи рекомендует использовать модель Добсона для оценки радиофизических характеристик подстилающей поверхности [2, 3]. Эта модель разработана на основе экспериментальных данных, полученных на частотах выше 1 ГГц для пяти типов почв характерных для умеренного климатического пояса. При решении обратной задачи дистанционного радиометрического зондирования используется обобщенная рефракционная диэлектрическая модель, позволяющая определить КДП влажных почв на частотах СВЧ диапазона волн [4], разработанная в Институте физики имени Л.В. Киренского на основании обобщения результатов измерений КДП десятков почв разных климатических зон. Стоит отметить вклад омских учёных в решение научных вопросов диэлькометрии сыпучих смесей. Так, научным коллективом Омского государственного педагогического университета (ОмГПУ) разработан метод, с помощью которого удалось разработать релаксационную диэлектрическую модель песчаных почв в широком частотном диапазоне [5]. Входными параметрами моделей КДП влажных почв являются объёмные доли влаги, физического песка и глины. Указанные модели позволяют произвести оценку КДП с приемлемой точностью при их использовании в условиях, близким к наблюдавшимся, при получении исходных эмпирических данных. По этой причине получение новых данных о КДП влажных почв, которые могут быть использованы для обобщения и систематизации известных и разработки новых диэлектрических моделей является актуальной научной задачей.

II. Описание методики измерений

Измерения КДП образцов почв осуществлялись с помощью методики, разработанной сотрудниками Лаборатории диэлькометрии и петрофизики ОмГПУ [6] на базе совместной лаборатории Института радиофизики и физической электроники (ИРФЭ) в составе Омского научного центра СО РАН и АО «ОНИИП». Эта методика позволяет проводить измерения КДП в широком частотном диапазоне (от единиц килогерц до нескольких гигагерц) без изменения структуры образца. В процессе измерений образец находится в одной ячейке, представляющей собой отрезок коаксиальной линии. Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рис. 1.

Измерение комплексного коэффициента передачи

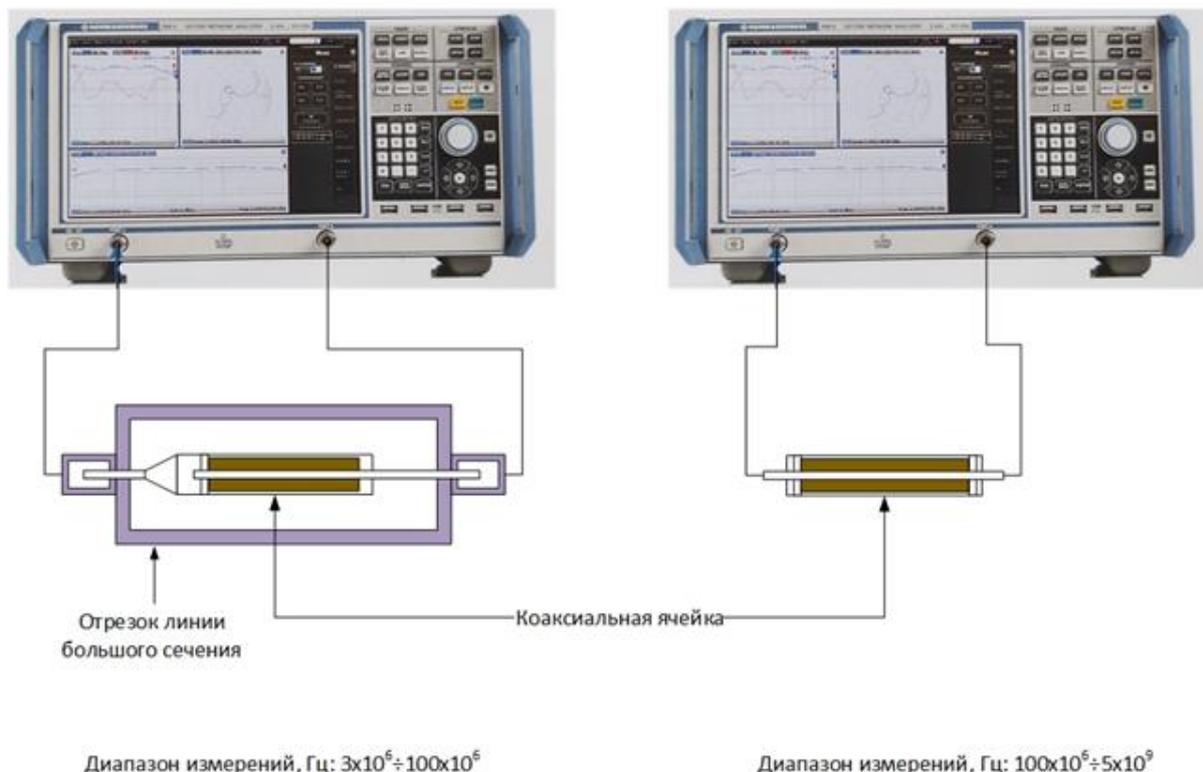


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для определения частотной зависимости КДП образца

В данной работе мы проводили измерения диэлектрической проницаемости почвенных образцов в диапазоне частот 5 МГц-4 ГГц. Согласно данным, приведённым в [6], погрешность измерений действительной и мнимой частей КДП с использованием векторного анализатора цепей определяется влажностью образца, его гидрофизическими характеристиками и длиной коаксиальной линии, в которой он находится. Наибольшее значение относительной погрешности не превышает 6% как для действительной, так и для мнимой частей КДП, что наблюдается при измерении КДП очень влажного образца в относительно длинной ячейке. При правильном выборе длины ячейки для образца с определённой влажностью относительная погрешность не превышает 2,5%.

В процессе измерений определялись диэлектрические характеристики трёх образцов: суглинистой почвы умеренной климатической зоны, отобранной в двух горизонтах (0-10 см, и 40-50 см), и песчаной почвы. Территориально места отбора проб располагались на юго-западе Омской области. Перед измерением с образцом почвы выполнялись необходимые подготовительные процедуры. Крупные включения (части растений, гравий и др.) из образца почвы удаляли. После образец смачивался до очень высокой влажности (более $0,5 \text{ см}^3/\text{см}^3$) деионизированной водой. Это исключало возможность изменения солевого состава образца почвы. Изменение влажности образца происходило в процессе естественного испарения. Объёмная влажность пробы определялась термостатно-весовым методом.

Перед измерением образец почвы при текущей влажности вносили внутрь коаксиальной ячейки и выдерживали в ней в течение суток. В дальнейшем выполнялись измерения параметров матрицы рассеяния (S-параметры) коаксиальной ячейки с образцом. Определение значений КДП осуществлялось в процессе минимизации функции невязки между значениями S-параметров определёнными экспериментально и рассчитанными теоретически.

III. Результаты и обсуждение

Результаты измерений спектров КДП образцов почв приведены на рис. 2. Как общую тенденцию в поведении КДП стоит отметить рост значений действительной и мнимой частей при уменьшении частоты, что не описывается моделью Добсона.

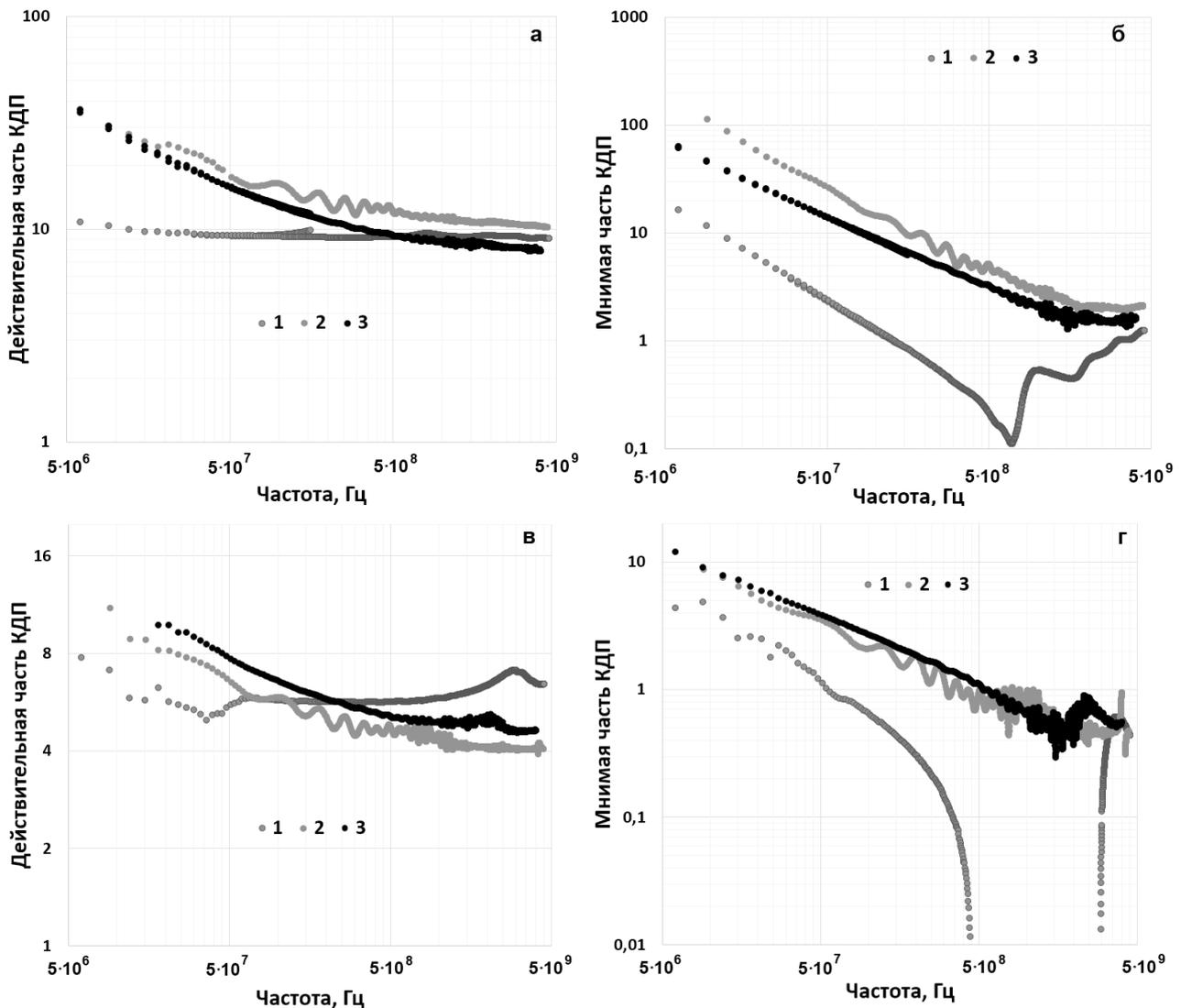


Рис. 2. Диэлектрические спектры песчаной почвы (1), суглинистой почвы верхнего (2) и нижнего (3) горизонтов при влажностях 20% (а, б) и 10% (в, г).

Согласно модели Добсона действительная часть КДП мало изменяется на частотах ниже 100 МГц. Это объясняется отсутствием экспериментальных диэлектрических данных, использовавшихся при создании модели Добсона, в указанном частотном диапазоне. На частотах ниже 300 МГц значения действительной и мнимой частей КДП проницаемости суглинка выше, чем у песчаной почвы. Что объясняется большей удельной поверхностью суглинистой почвы, а, следовательно, более заметным влиянием процессов диэлектрической релаксации, в частности обусловленном поляризационными явлениями на границе «твёрдая фаза – вода». На частотах выше 1 ГГц при малой влажности (10%) значения действительной части КДП песчаной почвы больше чем у суглинистой, что объясняется большим содержанием связанной воды у последней (см. рис. 2а и в). Как известно, связанная вода, молекулы которой интенсивно взаимодействуют с минеральной частицей, слагающей почву, отличаются меньшей подвижностью по сравнению со свободной, что приводит к уменьшению действительной части КДП.

Так же можно отметить отличия между КДП образцов суглинистой почвы, отобранных на разных горизонтах, что может свидетельствовать об отличиях в гранулометрическом и солевом составе. При этом характер отличий изменяется при росте влажности образца. Значения действительной части КДП суглинистой почвы нижнего горизонта больше, чем у верхнего во всём диапазоне частот при малой влажности образцов (10%). С увеличением влажности характер соотношения изменяется на противоположный (см. рис. 2а и в).

Для диапазона частот от 500 МГц – 1 ГГц наблюдается минимум кривой, описывающей спектр мнимой части КДП песчаной почвы. Аналогичные характер зависимости даёт зависимость, рассчитанная по модели Добсона. При этом, с увеличением влажности значения КДП становятся крайне низкими, сопоставимыми с погрешностью измерений (см. рис. 2б и г).

В целом можно отметить, что диэлектрические характеристики исследуемых образцов заметно отличаются друг от друга. Этот факт в очередной раз свидетельствует о необходимости накопления данных о КДП разных типов почв в широком диапазоне влажностей и частот.

VI. Выводы и заключение

Проведённые исследования показали заметное отличие в диэлектрических характеристиках почв, отличающихся содержанием физического песка и глины. Причина этих отличий заключается в особенностях гидрофизических характеристик почв, приводящих к разному распределению почвенной влаги на поверхности минеральных частиц. Полученные результаты могут найти применение при оценке влияния подстилающей поверхности на процессы излучения и распространения радиоволн, и в перспективе, при совершенствовании диэлектрических моделей влажных почв.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

Список литературы

1. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий. URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2013sadvovskiy.pdf> (дата доступа: 30.04.2023).
2. Peplinski N. R., Ulaby F. T., Dobson M. C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range // IEEE Trans Geosci. and Remote Sens. 1995. Vol. 33, no. 3. Pp. 803-807.
3. Electrical characteristics of the surface of the Earth. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-6-202109-I!!PDF-E.pdf (дата доступа: 30.04.2023).
4. Mironov V. L., Bobrov P. P., Fomin S. V. Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. Vol. 10, no. 3. P. 603-606.
5. Бобров П. П., Красноухова В. Н., Крошка Е. С., Лапина А. С. Моделирование процессов диэлектрической релаксации во влажных песчаных породах // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60, № 4. С. 135-140.
6. Bobrov P. P., Repin A. V., Rodionova O. V. Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Property Measurements // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015. Vol. 53, no. 5. Pp. 2366-2372.

УДК 378:004

Применение интегральных подстроечных конденсаторов для настройки LC-фильтров Using of integrated tuning capacitors for tune-up of LC-filters

Ю. И. Егошин, Д. А. Борейко

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, г. Омск, Россия

Y. I. Egoshin, D.A. Boreyko

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russia

Аннотация. В работе предложена новая конструкция интегрального конденсатора, состоящего из земляной и потенциальной обкладки, которая представляет собой область основного номинала и зону подстройки в виде отдельных проводящих элементов. Представлен новый метод подстройки АЧХ LC-фильтра путем замены подборных и подстроечных SMD-конденсаторов интегральной подстроечной емкостью. Применение подобных конденсаторов для подстройки фильтров в диапазоне частот от 1000 МГц позволит сократить трудоемкость настройки и увеличить ее точность.

Ключевые слова: LTCC, LC-фильтр, АЧХ, подстроечный конденсатор.

Abstract. New construction of integrated capacitors consisting of ground and potential lining, which represents the main value area and tuning zone as a discrete conducting elements is shown. New method tuning of frequency response of LC-filters by changing of pick-up and tuning SMD capacitors with integrated tuning capacitors. The use of such

capacitors for tuning of filters in the frequency range from 1000 MHz will reduce the complexity of tuning and increase its accuracy.

Keywords: LTCC, LC-filter, frequency response, tuning capacitor

I. Введение

На сегодняшний день в современных системах радиосвязи находят применение классические LC-фильтры, выполненные на SMD-компонентах, таких как катушки индуктивности и конденсаторы [1, 2]. При этом для ряда схем LC-фильтров на диапазон частот свыше 1000 МГц существует проблема подстройки АЧХ, которая заключается в том, что подстроечные конденсаторы отечественного производства имеют большие габаритные размеры и минимальный диапазон перестройки от 1 до 5 пФ. Данная проблема могла бы быть решена путем введения в схему подборных конденсаторов. Однако допуск на номинальное значение конденсатора маленькой емкости (от 0.47 до 1.9 пФ) обычно составляет от 0.25 до 0.5 пФ и в пределах партии может иметь отклонение либо только в плюс, либо только в минус от номинального значения. Процесс выборки конденсаторов с нужным допуском делает настройку фильтра не только трудоемкой, но еще и дорогостоящей.

Цель работы – исследование возможности применения подстроечных конденсаторов, выполненных на керамической подложке LTCC, для настройки АЧХ LC-фильтров.

II. Постановка задачи

Как показано в работах [3-5], интегральные конденсаторы могут быть выполнены в виде обкладок, расположенных непосредственно друг над другом в слоях керамики (рис. 1). Авторами данной работы предлагается новая конструкция интегрального конденсатора, у которого одна из потенциальных обкладок находится на внешнем слое керамической подложки и выполнена в виде отдельных проводящих элементов. Такие конденсаторы можно назвать интегральными подстроечными конденсаторами (ИПК). Применение ИПК в LC-фильтрах позволит настраивать АЧХ фильтров без использования дискретных подборных и подстроечных конденсаторов.

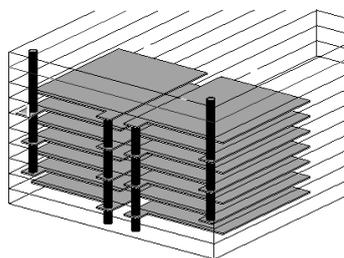
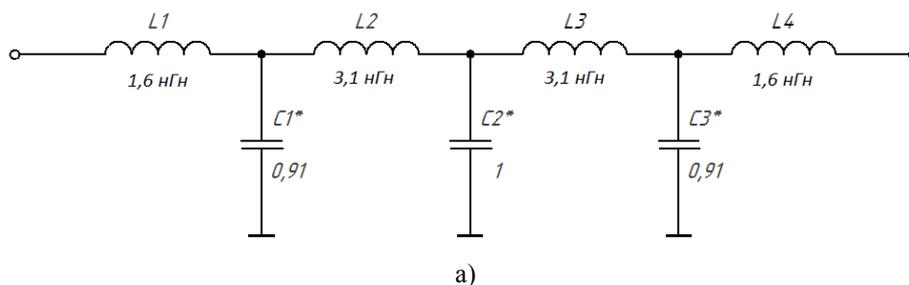
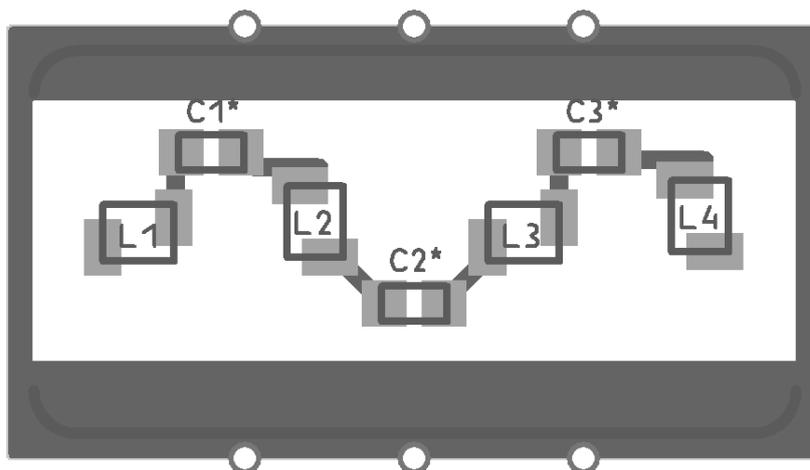


Рис. 1. Внешний вид интегрального конденсатора

В качестве примера рассмотрим LC-фильтр нижних частот с частотой среза 5000 МГц. Электрическая схема и топология фильтра, выполненного на SMD-компонентах с подборными конденсаторами, представлены на рис. 2 а и б соответственно.





б)

Рис. 2. Электрическая схема LC-фильтра с подборными конденсаторами(а), топология LC-фильтра с подборными конденсаторами(б)

В таком исполнении процесс подбора происходит путем перепайки элементов до достижения необходимой АЧХ фильтра.

Как видно из рис. 2 а номинальные значения конденсаторов составляют от 0.91 до 1 пФ. Такие конденсаторы могут быть выполнены в структуре подложки LTCC с возможностью подстройки посредством последовательного наращивания площади верхней обкладки ИПК.

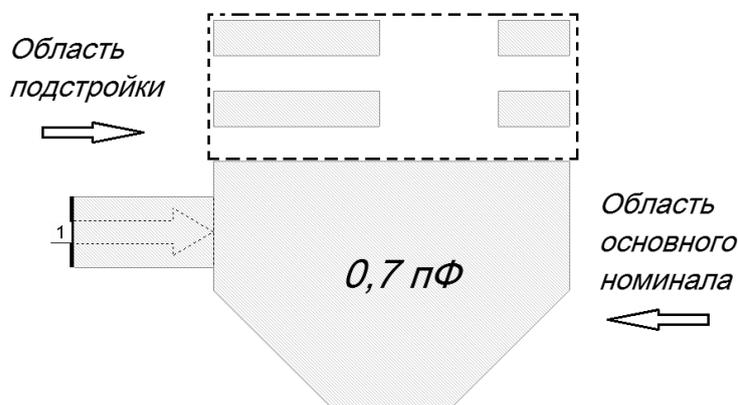
III. Теория

Так как номинальные значения $C1 \dots C3$ лежат в интервале от 0.91 до 1 пФ, то диапазон перестройки ИПК был выбран в промежутке от 0.7 до 1.1 пФ. Очевидно, что изначально было необходимо рассчитать конденсатор на минимальную емкость из диапазона перестройки равную 0.7 пФ.

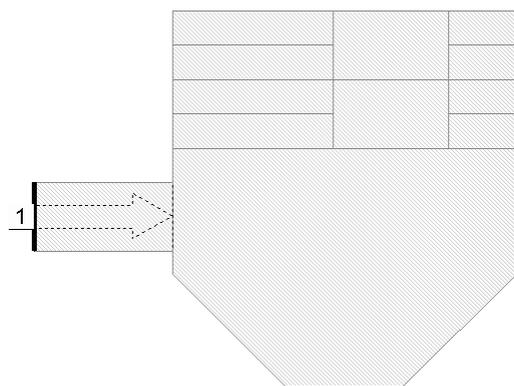
В качестве материала платы выбрана отечественная керамика СКМ-0.25. Общая высота керамической подложки, выполненной из 6 слоев, составляет 1.5 см.

Конструкция ИПК состоит из области основной номинальной емкости (0.7 пФ) и области подстройки. Область основной номинальной емкости представляет собой одну заземленную и одну потенциальную обкладку. Область подстройки выполнена в виде отдельных проводящих элементов, которые при гальваническом соединении позволяют наращивать емкость до нужного номинального значения (с шагом от 0.07 до 0.12 пФ). Размеры потенциальной обкладки ИПК, при достижении максимального номинала из диапазона подстройки, составляют 3.3x3 мм.

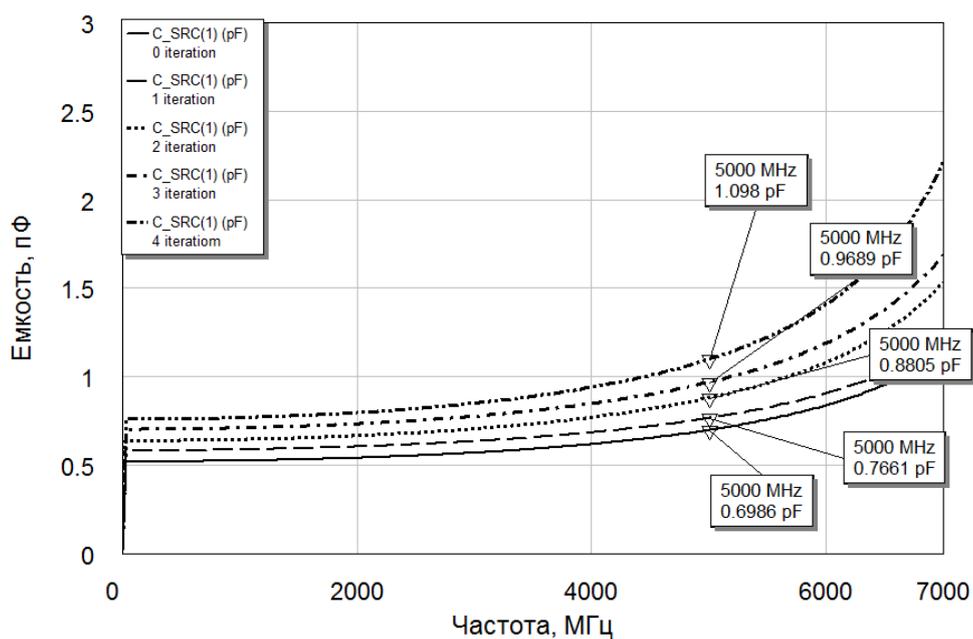
Внешний вид рассчитанного ИПК представлен на рис. 3 а и б, графики емкости промежуточных этапов подстройки представлены на рис. 3 в.



а)



б)



в)

Рис. 3. Топология ИПК с номиналом 0.7 пФ(а), топология ИПК с номиналом 1.1 пФ(б), график значений емкости на разных итерациях подстройки (в)
 На рис. 4 представлена топология платы, выполненной с применением трех ИПК.

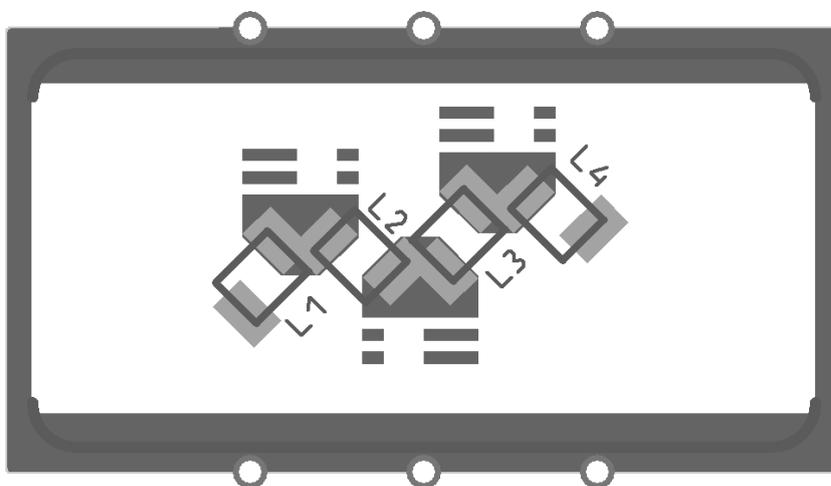


Рис. 4. Топология фильтра с использованием ИПК.

Для того, чтобы не перекрывать контактными площадками области подстройки ИПК, чип-катушки индуктивности расположены под углом 45 градусов.

IV. Выводы и заключение

В работе показана возможность реализации интегральной подстроечной емкости, выполненной в объеме многослойной керамической платы, верхняя потенциальная обкладка которой представляет собой сегментированную структуру. Использование такого конденсатора в качестве подстроечного элемента в фильтрах СВЧ-диапазона является альтернативой подстроечным и подборным SMD-конденсаторам и позволяет сократить трудоемкость настройки фильтра и увеличить ее точность. Также, при использовании ИПК увеличивается технологичность изготовления элемента, поскольку подобные конденсаторы являются элементами печатной платы и изготавливаются в едином цикле.

Список литературы

1. Петросян Н. Влияние входного фильтра на характеристики импульсных преобразователей постоянного напряжения // Силовая электроника. 2018. № 2. С. 30–33.
2. Пивоваров И., Похвалин А. Опыт проектирования высокочастотных фильтров с использованием элементной базы фирмы American Technical Ceramics (ATC) // Компоненты и технологии. 2007. № 4. С. 190–193.
3. Борейко Д. А. Исследование влияния конструктивных параметров на характеристики интегральных конденсаторов // Техника радиосвязи. 2014. Вып. 2 (22). С. 91–100.
4. Вендик И. Б., Холодняк Д.В., Симин А. В. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига // Компоненты и технологии. 2005. № 5. Ч.1. С. 190–196.
5. Хроленко Т. С., Тюменцев А. И. Вопросы реализации интегральных LC – фильтров на основе современных материалов // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. Вып. 7. С. 60–64.

УДК 537.87

О возможности использования уравнений тепло- и влагопереноса в пористых структурах при оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности в естественных условиях **On the possibility of using the equations of heat and moisture transport in porous structures for estimating the radiophysical characteristics of the underlying surface in natural state**

А. С. Ященко, К. В. Немчанов
Омский научный центр СО РАН (ИРФЭ), г. Омск, Россия

*A. S. Yashchenko, K. V. Nemchanov
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics), Omsk, Russia*

Аннотация. Приведены результаты обзора моделей тепло- и влагопереноса в пористых структурах, в основу которых положены дифференциальные уравнения Ричардсона и Фурье. Определены границы применимости уравнений, описывающих потоки тепла и влаги в почве. Произведена оценка возможности применения указанных моделей для определения вида профиля диэлектрической проницаемости почв при наличии априорной информации о их гидрофизических характеристиках и временного ряда метеоданных. В перспективе симбиоз моделей гидрофизики почв и распространения радиоволн позволит производить оценку радиофизических характеристик подстилающей поверхности в произвольный момент времени.

Ключевые слова: подстилающая поверхность, диэлектрическая проницаемость, движение почвенной влаги

Abstract. The results of a review of models of heat and moisture transport in porous structures based on Richardson and Fourier differential equations are presented. The limits of applicability of the equations describing the heat and moisture fluxes in the soil are determined. An assessment was made of the possibility of using these models to retrieval the type of soil permittivity profile in the presence of a priori information about their hydrophysical characteristics and a time series of meteorological data. In the future, the symbiosis of models of soil hydrophysics and radio wave propagation will make it possible to estimate the radiophysical characteristics of the underlying surface at an arbitrary moment in time.

Keywords: underlying surface, dielectric permittivity, soil moisture transport

I. Введение

Данные о комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) подстилающей поверхности находят широкое применение при решении ряда фундаментальных и прикладных научных задач. Так, значения диэлектрической проницаемости являются входными параметрами многих радиофизических моделей. Диэлектрические характеристики почв и грунтов определяются, в основном, объёмной долей влаги в их толще. Эта взаимосвязь обусловлена заметным отличием диэлектрических проницаемостей минерального скелета почвы и жидкой воды, имеющих характерное значение в 2,5 и 80 единиц для действительной части комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) соответственно [1, 2]. По этой причине, в результате суточных и сезонных вариаций влагосодержания в пределах скин-слоя почв происходит заметное изменение радиофизических характеристик подстилающей поверхности. Однако влияние этих эффектов чрезвычайно редко учитывается при решении прикладных задач излучения и распространения радиоволн. Так, на данный момент известны лишь отдельные работы, в которых рассматривается вопрос влияния вида профиля влажности (и диэлектрической проницаемости с ней связанной) на отражательные [3] и излучательные [4] характеристики подстилающей поверхности. При этом в большинстве случаев значения диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности того или иного географического региона считаются постоянными и независимыми как от времени суток, так и от времени года [5]. Очевидно, что подобное допущение может быть оправдано лишь для регионов с малыми суточными и сезонными вариациями погодных условий в окружающей среде. По этой причине разработка достоверной модели, позволяющей оценить вид профиля влажности в поверхностном слое почв, и при наличии диэлько-влажностных характеристик, профиль КДП в поверхностном слое почв, является актуальной научной задачей. Целью данной работы является оценка возможности использования моделей тепло- и влагопереноса для определения вида профиля влажности в поверхностном слое почв при решении прикладных задач электродинамики.

II. Описание и анализ моделей

В данной работе приведён обзор наиболее известных подходов для формального математического описания потоков тепла и влаги в пористых структурах, к которым в частности можно отнести почву. Описание процесса переноса жидкой влаги в почве осуществляется с помощью модифицированного уравнения Дарси или уравнения Ричардсона. В простейшем случае описание потока жидкой влаги в изотермической среде осуществляется с помощью модифицированного уравнения Дарси, представляющего собой дифференциальное уравнение первого рода [6]:

$$\frac{dW_T}{dt} = \frac{dK_{влт}(p_{кc})\left(\frac{dp_{кc}}{dx} - 1\right)}{dx} \quad (1a)$$

где $p_{кc}$ – капиллярно-сорбционный потенциал, зависящий от объёмной влажности почв W ; $K_{влт}(p_{кc})$ – изотермический коэффициент влагопроводности, зависящий от капиллярно-сорбционного давления; $dp_{кc}$ – изменение капиллярно-сорбционного потенциала в слое dx . Зависимость $p_{кc}$ также называют основной гидрофизической характеристикой (ОГХ). Выражение (1a) можно привести к виду, в котором будет присутствовать только одна функция – капиллярно-сорбционный потенциал. Для этого вводят параметр дифференциальной влагоёмкости $C = dp_{кc}/dW$. В итоге выражение (1a) примет следующий вид

$$C \frac{dp_{кc}}{dt} = \frac{d(K_{влт}(p_{кc})\left(\frac{dp_{кc}}{dx} - 1\right))}{dx}, \quad (1b)$$

Функция $K_{влт}(p_c)$ может быть описана в виде следующих выражений [8]:

$$K_{влт}(W) = K_s \left(\frac{W - W_r}{W_s - W_r}\right)^{0,5} \left[1 - \left[1 - \left(\frac{W - W_r}{W_s - W_r}\right)^{1/m} \right]^m \right]^2; \quad (2)$$

$$W = W_r + \frac{(W_s - W_r)}{(1 + (\alpha p_c)^n)^m}; \quad (3)$$

где W_r , W_s – минимальная влажность, соответствующая прочносвязанной, неподвижной для вязкого течения влаги и объёмная влажность почвы, соответствующая полному влагонасыщению, соответственно; K_s – коэффициент фильтрации; m , α , $n = 1/m$ – эмпирические коэффициенты. Использование модели, описываемой выражениями (1)-(3), позволило оценить профиль комплексной диэлектрической проницаемости почв, что в свою очередь определить направленные характеристики элементарного излучателя по истечению нескольких суточных циклов испарения [7]. Значения эмпирических коэффициентов приведено в таблице 1 [8]

ТАБЛИЦА 1
ЗНАЧЕНИЯ КОНСТАНТ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

Класс почвы (международный)	Примерный класс (отечественный)	θ_r	θ_s	α , 1/см	n	K_s , см/сут
Sand	Песок	0,045	0,43	0,145	2,68	713
Loamy sand	Супесь	0,057	0,41	0,124	2,28	350
Sandy loam	Суглинок легкий крупнопылеватый	0,065	0,41	0,075	1,89	106
Loam	Суглинок средний пылеватый	0,078	0,43	0,036	1,56	25
Silt	Средняя глина пылеватая	0,034	0,46	0,016	1,37	6
Silt loam	Легкая глина	0,067	0,45	0,020	1,41	11
Sandy clay loam	Тяжелый суглинок крупнопылеватомелкопесчаный	0,100	0,39	0,059	1,48	31
Clay loam	Суглинок средний иловатопылеватый	0,095	0,41	0,019	1,31	6
Silty clay loam	Суглинок тяжелый иловатый	0,089	0,43	0,010	1,23	2
Sandy clay	Легкая глина	0,100	0,38	0,027	1,23	3
Silty clay	Средняя глина иловато-пылеватая	0,070	0,36	0,005	1,09	0,5
Clay	Средняя (тяжелая) глина	0,068	0,38	0,008	1,09	5

Как можно видеть из приведённых данных вариации констант характерных для разных классов почв достигают десятки процентов от среднего значения. В реальности подстилающая поверхность представляет собой неизотермическую неоднородную среду, в которой кроме движения воды в жидкой форме наблюдается пароперенос. В этом случае выражение (1а) принимает вид [9]:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW_L}{dt} + \frac{dW_V}{dt} = \frac{dW_{LT}}{dt} + \frac{dW_{VnT}}{dt} + \frac{dW_{LT}}{dt} + \frac{dW_{VnT}}{dt}; \quad (4a)$$

где подстрочные символы L и V – подстрочные индексы, соответствующие переносу жидкой и парообразной влаги, T и nT – в изотермическом и неизотермическом случае соответственно. Каждое из слагаемых, входящих в уравнение (4а), можно описать выражением подобным (1а). В итоге выражение (4а), описывающее интегральный перенос жидкой и газообразной влаги, примет вид:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d(K_{влт}(\frac{dp_{жк}}{dx} - 1) + K_{влт} \frac{dT}{dx} + K_{прт} \frac{dp_{жк}}{dx} + K_{прнт} \frac{dT}{dx})}{dx}; \quad (4б)$$

где подстрочные индексы « T » и « nT » – описывают изотермический и неизотермический влагоперенос, для «вл_» и «пр_» – жидкой и парообразной влаги соответственно. Коэффициенты влагопереноса параметризуются либо относительно гидрофизических характеристик почв ($K_{влт}$ согласно уравнениям (2) и (3)), либо относительно метеопараметров атмосферы ($K_{влт}$, $K_{прт}$, $K_{прнт}$). Очевидно, что оценка профиля влажности согласно уравнениям (2)-(4) невозможна без наличия априорной информации о состоянии подстилающей поверхности.

Описание процесса теплопереноса осуществляется с помощью следующего выражения [9]:

$$q = -\lambda(W) \frac{\partial T}{\partial z} + C_{вл} T m_{вл} + C_{пр} T m_E + L q_{пр}; \quad (5)$$

где $\lambda(W)$ – теплопроводность грунта; $m_{вл}$, $m_{пр}$ – плотность потока влаги и жидкой воды; T – термодинамическая температура, L – удельная теплота парообразования, $C_{вл}$, $C_{пр}$ – теплоёмкости жидкой воды и пара соответственно. Наибольшую сложность представляет собой оценка теплопроводности грунта, поскольку так же, как и гидрофизические константы, этот параметр определяется эмпирическим путём.

Таким образом, при наличии априорной информации о гидро- и теплофизических характеристиках грунта, количестве поглощённой солнечной радиации, выпавших осадков, представляется возможным определить вид профиля влажности и температуры в поверхностном слое почв. Оценка радиофизических характеристик поверхности возможна при наличии дизелько-влажностных зависимостей почвы, полученных в широком диапазоне частот и влажностей.

III. Выводы и заключение

Анализ моделей показал, что достоверное описание процессов переноса тепла и влаги в поверхностном слое почв, а, следовательно, оценка вида профиля температуры и влажности, возможно при наличии априорной информации о свойствах почв и состоянии окружающей среды. Если информация о свойствах почв может быть извлечена из соответствующих тематических карт, то оценка состояния окружающей среды возможна при наличии доступа к временному ряду метеоданных. При наличии развёрнутой сети метеостанций получить интересные данные о состоянии атмосферы или поверхности почвы не представляется сложным. Однако, в

районах с низкой плотностью населения (большая часть Сибири и Дальнего Востока) метеостанции могут быть удалены друг от друга на расстоянии в сотни километров. В этом случае определить значения метеопараметров в интересующей точке поверхности возможно либо в результате аппроксимации данных, полученных на станциях наблюдения (что сопряжено с ростом погрешности), либо оценить их по данным, полученным спутниковыми оптическими, радиолокационными и радиометрическими сенсорами.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

Список литературы

1. Peplinski N. R., Ulaby F. T., Dobson M. C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range // IEEE Trans Geosci. and Remote Sens. 1995. Vol. 33, no. 3. Pp. 803–807.
2. Electrical characteristics of the surface of the Earth. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-6-202109-I!!PDF-E.pdf (дата доступа: 30.04.2023).
3. Ященко А. С., Кривальцевич С. В. Оценка эффективных значений диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 12 (24). С. 121–127.
4. Yashchenko A. S., Bobrov P. P. Impact of the Soil Moisture Distribution in the Top Layer on the Accuracy Moisture Retrieval by Microwave Radiometer Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2016. Vol. 54, no. 9. Pp. 5239–5246.
5. Мировой атлас проводимости почвы URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.832-4-201507-I!!MSW-R.docx
6. Шеин Е. В. Математические физически обоснованные модели в почвоведении: история развития, современное состояние, проблемы и перспективы (аналитический обзор) // Почвоведение. 2015. № 7. С. 816–823.
7. Ященко А. С., Немчанов К. В. Оценка направленных характеристик приповерхностного вертикального четвертьволнового монополя в ДКМВ-диапазоне на разных этапах испарения почвенной влаги // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 8. С. 45–50.
8. Carsel R. F., Parrish R. S.. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics // Water resources research. 1998. Vol. 24, no. 5. Pp. 755–769.
9. Hirotaka S., Jiri Š., Binayak P. M. Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor, and Heat Transport in the Vadose Zone // Vadose Zone Journal. 2006. Vol. 5. Pp. 784–800.

Построение и исследование устойчивости разностной схемы для линейной гиперболической системы с динамическими граничными условиями
Construction and study of the stability of a difference scheme for a linear hyperbolic system with dynamic boundary conditions

Р. Д. Алоев, М. Х. Овлаева, М. Нишоналиева
 Национальный университет Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан

R. D. Aloev, M. X. Ovlayeva, M. Nishonaliyeva
 National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Аннотация. Данная статья посвящена гиперболическим системам, управляемым динамическими граничными условиями. Предлагается разностная схема для численного решения этих систем. Представлена теорема устойчивости предложенной разностной схемы.

Ключевые слова: Римановы координаты, гиперболическая система, динамические граничные условия

Abstract. This article is devoted to hyperbolic systems controlled by dynamic boundary conditions. A difference scheme is proposed for the numerical solution of these systems. A stability theorem for the proposed difference scheme is presented.

Keywords: Riemannian coordinates, linear hyperbolic system, dynamic boundary conditions

I. Введение

В работе [1] приводится достаточное условие экспоненциальной устойчивости одномерных нелинейных гиперболических систем на ограниченном интервале, которое зависит от параметров граничных условий. Исследование основано на построении функции Ляпунова. Кроме того, полученное достаточное условие экспоненциальной устойчивости сравнивается с результатами других авторов.

В [2] исследуется задача управления температурой. Сначала представлены схема и описание пилотного процесса, после чего следует его моделирование с использованием дифференциальных уравнений в частных производных. Результаты моделирования подтверждают выполненное моделирование и показывают эффективность разработанных наблюдателя и контроллера.

Статьи [3]-[5] посвящены проблемам построения и исследования экспоненциальной устойчивости численного решения смешанных задач для гиперболических систем.

II. Постановка задачи

Рассмотрим следующую линейную гиперболическую систему уравнений в римановых координатах:

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial t} + \Lambda \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = 0, \quad \forall x \in [0,1], t \geq 0. \quad (1)$$

где Λ диагональная и обратимая матрица размерности $n \times n$ такая, что

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \text{ с} \\ \lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_{m-1} < \lambda_m < 0 < \lambda_{m+1} < \lambda_{m+2} < \dots < \lambda_n. \quad (2)$$

Пусть $m = 0$.

Неизвестную вектор функцию V представим в виде

$$V(x,t) = \begin{bmatrix} V^I(x,t) \\ V^{II}(x,t) \end{bmatrix}, V^I = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T, V^{II} = (v_{m+1}, v_{m+2}, \dots, v_n)^T.$$

Введём в рассмотрение обозначение

$$|\Lambda| = \text{diag}(|\lambda_1|, |\lambda_2|, \dots, |\lambda_n|). \quad (3)$$

Линейные гиперболические системы с динамикой, связанной с их граничными условиями, менее изучены в литературе, хотя существуют подходы, использующие конечномерные приближения, такие как в [2], которые успешно стабилизировали такие системы. Рассмотрим следующую динамику для граничных условий

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V^I(1,t) \\ V^{II}(0,t) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V^I(1,t) \\ V^{II}(0,t) \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} V^I(0,t) \\ V^{II}(1,t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Пусть дана непрерывно дифференцируемая вектор-функция V^0 удовлетворяющее условиям согласования (как самой функции, так и её первой производной) начальных и граничных условий, то начальное условие можно определить как:

$$V(x, 0) = V^0(x), \quad \forall x \in [0, 1] \quad (6)$$

$$V^0(x) = (v_1^0(x), v_2^0(x), \dots, v_n^0(x))^T.$$

Аналізу устойчивости (1), (5) и (6) с помощью функций Ляпунова посвящена работа [4]. В ней сформулировано достаточное условие экспоненциальной устойчивости (1), (5) и (6).

Разностная схема

Рассмотрим смешанную задачу (1), (5) и (6).

В области $G = \{(t, x): 0 \leq t \leq T, 0 \leq x \leq 1\}$ построим разностную сетку с шагами Δt по направлению t и Δx по направлению x . Узловые точки разностной сетки (означающие пересечению прямых линий $t = t^k \triangleq k \Delta t$ и $x = x_j \triangleq j \Delta x$) обозначим через (x_j, t^k) . Множество узловых точек разностной сетки обозначим через G_h , где

$$G_h \triangleq \{(x_j, t^k): k = 0, \dots, N; j = 0, \dots, J\},$$

И значения численного решения в узловых точках обозначим через

$$V_j^k = V(x_j, t^k), \quad k = 0, \dots, N; j = 0, \dots, J.$$

Шаги разностной сетки Δt , Δx подберем таким образом, чтобы выполнялись равенства $N \Delta t = T$ и $J \Delta x = L$.

Для нахождения численного решения смешанной задачи (1), (5) и (6) над разностной сеткой G_h , предлагаем следующую разностную схему. Вычислим численное решение смешанной задачи (1), (5) и (6) на следующей разностной сетке.

$$(v_i)^{k+1}_j = (v_i)^k_j - \lambda_i \frac{\Delta t}{\Delta x} [(v_i)^{k+1}_j - (v_i)^{k+1}_{j-1}], \quad j = \overline{1, J}; k = \overline{0, N-1}; i = \overline{1, n}; \quad (7)$$

или в векторной форме

$$V_j^{k+1} = V_j^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \Lambda [V_j^{k+1} - V_{j-1}^{k+1}], \quad j = \overline{1, J}; k = \overline{0, N-1}. \quad (8)$$

Начальные условия (5) аппроксимируются следующим образом:

$$(v_i)^0_j = v_i^0(x_j), \quad j = \overline{0, J}; i = \overline{1, n}; \quad (9)$$

или в векторной форме

$$(V)_j^0 = V^0(x_j), \quad j = \overline{0, J}. \quad (10)$$

Граничные условия аппроксимируются следующим способом:

$$\frac{v_0^{k+1} - v_0^k}{\Delta t} = AV_0^{k+1} + BV_0^{k+1}, \quad k = \overline{1, N-1}. \quad (11)$$

Определение. Решение разностной схемы (8), (10) удовлетворяющий граничным условиям (11) называется экспоненциально устойчивым, если существуют такие положительные константы $\varsigma > 0$ и $c_{1,2} > 0$ что для любого начального условия $V^0(x_j)$ для которой

$$(V^0(0), V^0(0)) + \Delta x \sum_{j=1}^J (V^0(x_j), V^0(x_j)) \leq c_1, \quad (12)$$

решение разностной начально-краевой задачи (8),(10),(11) удовлетворяет неравенству

$$(V_0^k, V_0^k) + \Delta x \sum_{j=1}^J (V_j^k, V_j^k) \leq c_2 (1 - \Delta t \varsigma)^k \left\{ (V^0(0), V^0(0)) + \Delta x \sum_{j=1}^J (V^0(x_j), V^0(x_j)) \right\}, \quad k = \overline{1, N}. \quad (13)$$

Рассмотрим задачу анализа экспоненциальной устойчивости начально-краевой разностной задачи (8), (10), (11). Основная цель заключается в том, что с помощью построения дискретной функции Ляпунова сформулировать достаточное условие экспоненциальной устойчивости начально-краевой разностной задачи (8), (10), (11). Основные результаты, полученные для начально-краевой разностной задачи (8), (10), (11), можно свести к следующей теореме.

Теорема. Рассмотрим начально-краевую разностную задачу (8), (10), (11). Предположим, что существует диагональная положительно определенная матрица P размерности $n \times n$ такая, что выполняется следующее линейное матричное неравенство

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + P\Lambda & PB \\ B^T P & P\Lambda \end{bmatrix} < 0. \quad (14)$$

Тогда существуют две константы $\alpha > 0$ и $M > 0$ такие, что для любого начального условия $V^0(x_j)$ удовлетворяющего (12), решение разностной начально-краевой задачи (8), (10), (11) удовлетворяет неравенству (13), т.е решение разностной схемы (8), (10) удовлетворяющий граничным условиям (11) будет экспоненциально устойчивым.

III. Заключение

Мы рассмотрели линейную гиперболическую систему с динамическими граничными условиями. Построена разностная схема численного решения этих систем. Приводится теорема, доказывающая устойчивость этой схемы.

Список литературы

1. Coron J.-M., Bastin G., Novel B. d'Andréa. Dissipative boundary conditions for one-dimensional nonlinear hyperbolic systems // SIAM J. Control Optim. 2008. Vol. 47, no. 3. Pp.1460–1498,

2. Castillo F., Witrant E., Prieur C., Dugard L. Dynamic Boundary Stabilization of Hyperbolic Systems // 51th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2012), Maui, Hawaii : United States. 2012.
3. Alov R., Berdyshev A., Bliyeva D., Dadabayev S., Baishemirov Z. Stability Analysis of an Upwind Difference Splitting Scheme for Two-Dimensional Saint–Venant Equations // Symmetry. 2022. Vol. 14, is. 10. DOI: 10.3390/sym14101986.
4. Alov R. D., Hudayberganov M. U. A Discrete Analogue of the Lyapunov Function for Hyperbolic Systems // Journal of Mathematical Sciences (United States).2022. Vol. 264, is. 6. Pp. 661–671. DOI: 10.1007/s10958-022-06028-y.
5. Alov R. D., Eshkuvatov Z. K., Khudoyberganov M. U., Nematova D. E. The Difference Splitting Scheme for n-Dimensional Hyperbolic Systems // Malaysian Journal of Mathematical Sciences. 2022 . Vol. 16, is.1. Pp. 1–10.

УДК 519.63

Исследование экспоненциальной устойчивости численного решения гиперболического уравнения с отрицательной нелокальной характеристической скорости и погрешностью измерения
Investigation of the exponential stability of the numerical solution of a hyperbolic equation with a negative nonlocal characteristic velocity and measurement error

Р. Д. Алов, В. Б. Алимова
Национальный университет Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан
 R. D. Alov, V.B. Alimova
National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Аннотация. В настоящей работе исследуется проблема стабилизации состояния равновесия для гиперболического уравнения с *отрицательной* нелокальной характеристической скорости и ошибкой измерения. Приведена постановка смешанной задачи управления. Дано определение слабого решения, экспоненциальной устойчивости равновесия смешанной задачи и функции Ляпунова. Определяется устойчивость в L^2 –норме относительно дискретного возмущения состояния равновесия начально-краевой разностной задачи. Доказана устойчивость численного решения.

Ключевые слова: Гиперболическое уравнение, нелокальная характеристическая скорость, устойчивость, явная разностная схема.

Abstract. In this paper, we study the problem of stabilizing the equilibrium state for a hyperbolic equation with a *negative* nonlocal characteristic velocity and measurement error. The formulation of the mixed control problem is given. A definition of a weak solution, exponential stability of an equilibrium of a mixed problem, and a Lyapunov function is given. The stability in the L^2 –norm with respect to a discrete perturbation of the equilibrium state of the initial-boundary difference problem is determined. The stability of the numerical solution is proved.

Keywords: Hyperbolic equation, nonlocal characteristic velocity, stability, explicit difference scheme.

I. Введение

В работе [1] исследуется вопрос устойчивости решения скалярного закона сохранения с положительной нелокальной скоростью, который моделирует производственную систему с высокой реентерабельностью, встречающуюся в производстве полупроводников. Спектральным анализом получена экспоненциальная устойчивость решения линеаризованной системы управления. Кроме того, с помощью функции Ляпунова доказана экспоненциальная устойчивость решения нелинейной управляемой системы в некоторых случаях.

В статье [2] исследуется устойчивость решения класса нелинейных уравнений переноса с положительной нелокальной скоростью. Он моделирует систему с высоким уровнем повторного входа, которая широко используется в производстве полупроводников. Экспоненциальная устойчивость решения задачи постоянного равновесия доказана методом функций Ляпунова. Методом функций Ляпунова получена экспоненциальная устойчивость дискретной системы.

Работа [3] посвящена исследованию экспоненциальной устойчивости равновесия для скалярного закона сохранения с положительной нелокальной скоростью и ошибкой измерения, возникающей в производственной системе с высокой реентерабельностью. С помощью подходящей функции Ляпунова доказываются достаточные и необходимые условия на устойчивость, как для непрерывной, так и для дискретной задачи.

II. Постановка задачи

Рассмотрим гиперболическое уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \mu(a(t)) \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad t \in [0, +\infty), x \in [0, 1], \quad (1)$$

где характеристическая скорость $-\mu(a(t))$ зависит от интеграла неизвестной функции по всей области $[0, 1]$, т.е. глобально

$$a(t) = \int_0^1 u(t, x) dx, \quad t \in (0, +\infty). \quad (2)$$

Начальное условие для уравнения (1) имеет вид

$$u(0, x) = u_0(x), \quad x \in [0, 1]. \quad (3)$$

Для простоты предположим, что функция характеристической скорости $-\mu(a(t)) < 0$ – отрицательная. В работе [2] рассматривается случай, когда функция характеристической скорости – является положительной. В силу того, что $-\mu(a(t)) < 0$ граничное условие требуется только на *правой* границе при $x = 0$

$$u(t, 1)\mu(a(t)) = V(t). \quad (4)$$

Функция управления $V(t)$ используется для управления системой, т.е. обеспечением устойчивости равновесного состояния. При соответствующем выборе $\mu, u_0, V(t)$ можно доказать корректность постановки смешанной задачи.

В этой работе рассмотрим один частный случай задания граничного условия относительно гиперболического уравнения с нелокальной характеристической скоростью. Здесь исследуем глобальную обратную стабилизацию замкнутой системы в уравнении (1) по закону обратной связи:

$$-V(t) + u^* \mu(u^*) = r \{ -[u(t, 0) + \delta(t)] \mu(a(t)) + u^* \mu(u^*) \}, \quad t \in (0, +\infty) \quad (5)$$

где $r \in [0, 1)$ – коэффициент обратной связи, а $u^* > 0$ – заданное равновесие и $\delta(t)$ – ограниченное возмущение. Заметим, что при заданном равновесии, значение характеристической функции вычисляется следующим образом

$$-\mu(a(t))|_{u=u^*} = -\mu\left(\int_0^1 u^* dx\right) = -\mu(u^*).$$

В настоящей работе ограничиваемся следующим семейством характеристических скоростей типа

$$\mu(s) = \frac{P}{Q+s}, \quad s \in [0, +\infty) \quad \text{с } P > 0, Q > 0. \quad (6)$$

Тогда очевидно, что $\mu(s) > 0, \forall s \in [0, +\infty)$.

III. Дифференциальная задача

Итак, рассмотрим следующую задачу управления

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} - \mu(a(t)) \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad t \in (0, +\infty), x \in (0, 1), \\ u(0, x) = u_0(x), \quad x \in (0, 1), \\ V(t) - u^* \mu(u^*) = r \{ [u(t, 0) + \delta(t)] \mu(a(t)) - u^* \mu(u^*) \}, \quad t \in (0, +\infty) \\ u(t, 1)\mu(a(t)) = V(t), \quad t \in [0, +\infty), \\ a(t) = \int_0^1 u(t, x) dx, \quad t \in (0, +\infty), \end{array} \right. \quad (7)$$

где $u(t, x)$ – подлежащая определению функция, $-\mu(a(t)) \in C^1([0, +\infty), (0, +\infty))$ – функция характеристической скорости, $a(t)$ – интеграл от неизвестной функции $u(t, x)$, $V(t)$ – является контроллером, $r \in [0, 1)$ – неотрицательный коэффициент обратной связи, u^* – является равновесным решением, $\delta(t)$ – является ограниченным (известным) возмущением.

Как и в ([2], раздел 4.2), мы применим для численного расчета системы (7) противопоточную разностную схему. Для этого, покрываем пространственную область $[0, 1]$ с помощью равномерной сетки $\Omega_h = \{x_i = ih, i = \overline{0, T}\}$, h – шаг по x . Интеграл $a(t)$ для каждого значения по $t^k \triangleq k\tau, k = \{1, 2, \dots\}$ вычислим с помощью квадратурной формулы

$$a^k = h \sum_{i=0}^T u_i^k, \quad k = \{1, 2, \dots\}. \quad (13)$$

Здесь τ – шаг по времени. Далее определим дискретное значение μ^k

$$\mu^k \triangleq \mu(a^k) = \frac{P}{Q+a^k}, \quad P > 0, Q > 0. \quad (14)$$

Предположим, что выполнено условия Куранта-Фридрихса-Леви

$$0 < \lambda^k \triangleq \mu^k \frac{\tau}{h} \leq 1, \quad k = \{1, 2, \dots\}. \quad (15)$$

Для численного решения системы (7) предлагаем противопоточную разностную схему

$$\begin{cases} u_i^{k+1} = (1 - \lambda^k)u_i^k + \lambda^k u_{i+1}^k, & i = \overline{0, I-1}; & k \in \{0, 1, \dots\}; \\ u_i^{k+1} = r u_0^{k+1} + (1-r) \frac{u^* \mu(u^*)}{\mu^k} + r \delta^{k+1}, & k \in \{0, 1, \dots\}; \\ u_i^0 = u_0(x_i), & i = \overline{0, I}. \end{cases} \quad (16)$$

Определение 1. Пусть $\Delta > 0$. Состояние равновесия u^* начально-краевой разностной задачи (25) является устойчивым в L^2 -норме относительно дискретных возмущений $\partial^k \leq \Delta$, $k \in \{1, 2, \dots\}$, если существуют положительные вещественные константы $\zeta_1 > 0$, $\zeta_2 > 0$ и $\zeta_3 > 0$ такие, что для любого начального условия $u_i^0, i \in \{0, 1, 2, \dots, I\}$ решение $u_i^k, i \in \{0, 1, 2, \dots\}, k \in \{0, 1, \dots, I-1\}$ начально-краевой разностной задачи (16) удовлетворяет

$$\|\vec{u}^k - u^* \vec{e}\|_{l^2} \leq \zeta_2 e^{-\zeta_1 t^k} \|\vec{u}^0\|_{l^2} + \zeta_3 \max_{0 \leq s < k} (|\delta^s|), \quad k \in \{1, 2, \dots\}, \quad (17)$$

где

$$\vec{u}^k = (u_0^k, u_1^k, \dots, u_{I-1}^k)^T, \quad \vec{e} = \overbrace{(1, 1, \dots, 1)}^I$$

и

$$\|\vec{u}^k - u^* \vec{e}\|_{l^2}^2 = h \sum_{i=0}^{I-1} (u_i^k - u^*)^2, \quad k \in \{0, 1, \dots\}.$$

Определение 2. (Дискретная функция Ляпунова). Говорят, что функция $\mathbf{L}: \mathbb{R}^I \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ является дискретной функцией Ляпунова для начально-краевой разностной задачи (16), если

(i) существуют положительные константы $\chi_1 > 0$ и $\chi_2 > 0$ такие, что для всех $k \in \{0, 1, \dots\}$:

$$\chi_1 \|\vec{u}^k - u^* \vec{e}\|_{l^2}^2 \leq \mathbf{L}(\vec{u}^k) \leq \chi_2 \|\vec{u}^k - u^* \vec{e}\|_{l^2}^2 \quad (18)$$

(ii) существуют положительные константы $\eta > 0$ и $\nu > 0$ такие, что для всех $k \in \{0, 1, \dots\}$:

$$\frac{\mathbf{L}(\vec{u}^{k+1}) - \mathbf{L}(\vec{u}^k)}{\Delta t} \leq -\eta \mathbf{L}(\vec{u}^k) + \nu (\delta^k)^2.$$

Для упрощения обозначений в дальнейшем мы будем определять последовательность дискретных значений \mathcal{L}^k как

$$\mathcal{L}^k = \mathbf{L}(\vec{u}^k), \quad k \in \{0, 1, \dots\}$$

и где \vec{u}^k заданное решение начально-краевой разностной задачи (16).

Теорема 1. (Дискретная устойчивость для случая $u^* \geq 0$). Предположим, что условие КФЛ (15) выполнено. Пусть $\Delta > 0$. Для каждого $u^* \geq 0$, каждого $r \in [0, 1)$, каждого $U > 0$ и для любых начальных данных

$$\begin{aligned} \vec{u}^0 &\triangleq (u_0^0, u_1^0, \dots, u_{I-1}^0)^T \text{ с } u_i^0 \geq 0, \quad i \in \{0, 1, 2, \dots, I\} \text{ и} \\ \|\vec{u}^0 - u^* \vec{e}\|_{l^2} &< U \end{aligned} \quad (19)$$

где $\vec{e} = \overbrace{(1, 1, \dots, 1)}^{I+1}$, решение $\vec{u}^k \triangleq (u_0^k, u_1^k, \dots, u_{I-1}^k)^T$ начально-краевой разностной задачи (16) удовлетворяет $u_i^k \geq 0$, $i \in \{0, 1, 2, \dots, I\}, k \in \{0, 1, \dots\}$, а стационарное состояние u^* начально-краевой разностной задачи (16) является устойчивым в l^2 -норме относительно любой дискретной функции возмущения δ^k , $k \in \{0, 1, \dots\}$, такой что $\delta^k \leq \Delta$.

Для анализа устойчивости начально-краевой разностной задачи (19) дискретным методом Ляпунова воспользуемся следующим преобразованием возмущения

$$\tilde{u}_i^k = u_i^k - u^*, \quad \tilde{a}^k = h \sum_{i=0}^{I-1} \tilde{u}_i^k, \quad \tilde{\mu}_a^k = \mu(u^* + \tilde{a}^k), \quad \tilde{\lambda}^k = \frac{\tau}{h} \tilde{\mu}_a^k, \quad k \in \{0, 1, \dots\} \quad (20)$$

Для простоты мы опускаем символ « \sim » в обозначениях (29) и дискретизируем систему в уравнении (16) следующим образом

$$\begin{cases} u_i^{k+1} = (1 - \lambda^k)u_i^k + \lambda^k u_{i+1}^k, & i = \overline{0, I-1}; & k \in \{0, 1, \dots\}; \\ u_i^{k+1} = r u_0^{k+1} + (1-r) \bar{\omega} a^{k+1} + r \delta^{k+1}, & \text{с } \bar{\omega} = \frac{u^*}{(Q+u^*)}, & k \in \{0, 1, \dots\}; \\ \lambda^k = \frac{\tau}{h} \mu_a^k, & k \in \{0, 1, \dots\}; \\ \mu_a^k = \mu(u^* + a^k), & k \in \{0, 1, \dots\}; \\ a^k = h \sum_{i=1}^I u_i^k \geq -u^*, & k \in \{0, 1, \dots\}; \\ \mu(s) = \frac{P}{Q+s}, & s \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

Таким образом, предположение в виде выполнения неравенства (19) в теореме 1 теперь выражается как

$$\|\vec{u}^0\|_{l^2} < U. \quad (22)$$

VI. Выводы и заключение

В работе исследована задача стабилизации состояния равновесия для гиперболического уравнения с отрицательной нелокальной характеристической скоростью и погрешностью измерения. Для нахождения численного решения уравнения построена разностная схема и доказана её устойчивость.

Список литературы

1. Coron, J. M., Wang Z. Output Feedback Stabilization for a Scalar Conservation Law with a Nonlocal Velocity // *SIAM J. Math. Anal.* 2013. Vol. 45. Pp. 2646–2665. DOI: 10.1137/120902203.
2. Chen W., Liu C., Wang Z. Global Feedback Stabilization for a Class of Nonlocal Transport Equations: The Continuous and Discrete Case // *SIAM J. Control Optim.* 2017. Vol. 55, is. 2. Pp. 760–784. DOI: 10.1137/15m1048914.
3. Simone Göttlich, Michael Herty and Gediyon Weldegiyorgis. Input-to-State Stability of a Scalar Conservation Law with Nonlocal Velocity. *Axioms* 2021. Vol. 10, is.1. Pp. 1–20. DOI: 10.3390/axioms10010012.

УДК 629.78

Системы коррекции низкой орбиты малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли Low orbit correction systems of the Earth Remote Sensing spacecraft

В. В. Волоцуев, А. С. Танеева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

V. V. Volotsuev, A. S. Taneeva

Samara National Research University, Samara, Russia

Аннотация. Проведен анализ проектных параметров малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли (МКА ДЗЗ). По проведенному анализу составлена модель малого космического аппарата, способного функционировать на высотах ниже 400 км. Подобрана система коррекции низкой орбиты проектируемого малого космического аппарата с помощью различных исполнительных органов.

Ключевые слова: космический аппарат, электротермический микродвигатель, электрореактивный двигатель, сверхнизкая орбита, верхняя атмосфера Земли, аэродинамическое торможение

Abstract. The analysis of the design parameters of a small spacecraft for remote sensing of the Earth (MCA remote sensing) is carried out. Based on the analysis, a model of a small spacecraft capable of operating at altitudes below 400 km has been compiled. A system for correcting the low orbit of the projected small spacecraft has been selected with the various actuators.

Keywords: spacecraft, electrothermal microdrive, electric jet engine, ultra-low orbit, Earth's upper atmosphere, aerodynamic braking.

I. Введение

Задачей, поставленной перед МКА ДЗЗ, является высокодетальное наблюдение и получение снимков в диапазоне 0.3...1.0 м [1]. Для выполнения поставленной задачи МКА должен быть размещен на низких или сверхнизких орбитах (до 400 км). Под действием аэродинамического сопротивления МКА будет иметь тенденцию к снижению радиуса рабочей орбиты, что в свою очередь должно быть скорректировано двигательной установкой.

II. Выбор проектных характеристик

При выборе проектных характеристик двигательной установки для длительного поддержания (3 - 5 лет) сверхнизкой орбиты следует учитывать проектные параметры МКА:

- параметры внешней геометрии и ориентации МКА относительно вектора направления полета, которые влияют на интенсивность уменьшения радиуса орбиты;
- параметры энергосистем МКА, которые влияют на уровень силы тяги и времени непрерывной работы ЭРДУ в цикле коррекции;
- целевые параметры производительности аппаратуры наблюдения, которые накладывают ограничения на режим работы двигательной установки (при целевом зондировании двигатель должен выключаться).

III. Анализ систем коррекции низкой орбиты МКА

Объектом исследования является система коррекции низких рабочих орбит (до 400 км) перспективного малого космического аппарата высокодетального дистанционного зондирования Земли.

Проведенные исследования показывают, что для поддержания сверхнизкой орбиты описанного МКА ДЗЗ достаточно силы тяги не более 20 мН даже при крайне плотных состояниях верхней атмосферы Земли на высотах порядка 300 км.

Для исследуемого МКА подходит электрореактивная двигательная установка (ЭРДУ), которая включает в свой состав два отечественных стационарных плазменных двигателя «СПД-50» (один работающий, второй в резерве). Для поддержания сверхнизкой рабочей орбиты в течение 5 лет потребуется не более 40 кг рабочего тела (ксенона) [2].

Для решения поставленной задачи также был рассмотрен электротермического микродвигателя (ЭТМД) в качестве корректирующей двигательной установки (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид ЭТМД

Изученные исследования показывают, что ЭТМД способен выдавать тягу до 20 мН и успешно использовался в качестве корректирующей двигательной установки маневрирующих малых космических аппаратов [3]. По проведенному в работе анализу можно сделать вывод, что ЭТМД будет способен включаться более 2тыс раз при тех же затратах рабочего тела, что и СПД-50.

IV. Результаты исследования

В качестве проектируемого космического аппарата была построена 3Д-модель МКА ДЗЗ с ЭРДУ в качестве системы коррекции низкой орбиты малого космического аппарата по средством математического моделирования параметров МКА.

Список литературы

1. Волоцув В. В. Низкоорбитальные космические аппараты высокодетального наблюдения с длительным сроком существования на рабочих орбитах высотой ниже четырехсот километров // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 12 (120).
2. Канев С. В., Петухов В. Г., Попов Г. А., Хартов С. А. Прямоточный электрореактивный двигатель для компенсации аэродинамического торможения низкоорбитальных космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 35–40.
3. Блинов В. Н., Шалай В. В., Зубарев С. И. [и др.]. Исследования электротермических микродвигателей корректирующих двигательных установок маневрирующих малых космических аппаратов. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2014. 264 с.

Компьютерное моделирование нестационарного взаимодействия ребристых оболочек с жидкостью

Computer simulation of transient interaction of ribbed shells with liquid

А. Б. Каршиев, А. А. Каюмов

Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммеда ал-Хоразмий, г. Самарканд, Узбекистан

A. B. Karshiev, A. A. Kayumov

Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorazmiy, Samarkand, Uzbekistan

Аннотация. В данной статье представлена методика компьютерного моделирования нестационарного взаимодействия ребристых оболочек с жидкостью. Разработан пакет прикладных программ, предназначенный для решения одно- и двумерных нелинейных задач динамики ребристых оболочек при импульсном нагружении с учетом контактного взаимодействия с жидкостью. Пакет прикладных программ ориентирован на моделирование процессов распространения импульсных волн в жидкости с последующим их взаимодействием с ребристой пологой сферической оболочкой. В состав пакета прикладных программ входят модели течения идеальной жидкости и движения ребристой сферической оболочки. Течение жидкости описывается уравнением сохранения импульса и массы, записанные для сферической системы координат. Движение ребристой оболочки описано уравнениями типа Тимошенко. Численное решение уравнений движения сред осуществляется методом конечных разностей. Проведены тестовые расчеты. На их основе обосновано применение разработанного пакета прикладных программ.

Ключевые слова: Ребристая оболочка; идеальная жидкость; импульсное нагружение; пакет прикладных программ; вычислительный эксперимент.

Abstract. This article presents the method of computer modeling of transient interaction of ribbed shells with liquid. A package of application programs has been developed designed to solve one- and two-dimensional nonlinear problems of the dynamics of ribbed shells at pulse loading, taking into account contact interaction with liquid. The package of application programs is focused on modeling the processes of propagation of pulsed waves in a liquid with their subsequent interaction with a ribbed flat spherical shell. The application package includes models of the flow of an ideal liquid and the movement of a ribbed spherical shell. The fluid flow is described by the momentum and mass conservation equation recorded for the spherical coordinate system. The motion of the ribbed sheath is described by Tymoshenko-type equations. Numerical solution of equations of media motion is carried out by method of finite differences. Test calculations were carried out. Based on them, the applicability of the developed application package is justified.

Keyword: Ribbed shell; ideal fluid; impulse loading; application package; computational experiment.

1. Введение

Оболочечные конструкции широко применяются в различных отраслях промышленности [1-4] и строительстве [5-6]. Для снижения материалоемкости без уменьшения несущей способности оболочка подкрепляется ребрами жесткости. Поэтому расчет ребристых оболочек имеет важное значение [7-12].

Современный уровень развития компьютерной техники, методов вычислительной математики и накопленный опыт программирования позволяют широко применять вычислительный эксперимент при решении прикладных задач динамики ребристых оболочек. Важным компонентом вычислительного эксперимента является пакет прикладных программ (ППП).

В настоящей работе описывается пакет прикладных программ, предназначенный для решения одно- и двумерных нелинейных задач динамики ребристых оболочек при импульсном нагружении с учетом контактного взаимодействия с жидкостью. ППП ориентирован на моделирование процессов распространения импульсных волн в жидкости с последующим их взаимодействием с ребристой пологой сферической оболочкой.

2. Материалы и методы

В состав ППП входят модели течения идеальной жидкости и движения ребристой сферической оболочки. Численное решение уравнений движения сред осуществляется методом конечных разностей.

Жидкость. Жидкость считаем идеальной средой. Для описания ее движения используем уравнения сохранения импульса и массы, записанные для сферической системы координат [11]:

$$\frac{\partial U_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_{жс}} \frac{\partial P}{\partial r}; \quad \frac{\partial U_\theta}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_{жс} r} \frac{\partial P}{\partial \theta}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_{жс}}{\partial t} = -\frac{\rho_{жс}}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r U_r) + \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} \right]; \quad U_r = \dot{r}, \dot{U} = \ddot{r}, \quad U_\theta = \dot{\theta}, \dot{U} = \ddot{\theta},$$

где U_r, U_θ - компоненты вектора скорости; $\rho_{жс}$ - плотность; P - давление; r, θ - лагранжевы пространственные координаты; точка над величиной обозначает производную по времени.

Для замыкания системы (1) используем уравнения состояния идеальной жидкости в форме Тэта.

Учет кавитационных эффектов в жидкости осуществляется на основе простейшей модели, суть которой заключается в следующем: если в микрообъеме жидкости давление падает ниже критического ($P_k = -0,2 \text{ МПа}$), то оно приравняется нулю; сплошность жидкости считается восстановленной, как только $P > P_k$.

Интегрирование уравнений гидродинамики проводится на основе конечно-разностной схемы по модификации Уилкинса [13], которая получила широкое распространение при исследованиях нестационарных волновых процессов в разных сплошных средах.

Рёбристая оболочка. Уравнения движения оболочки, подкреплённой ребрами жесткости в двух взаимно ортогональных направлениях, имеют вид [14]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} - \frac{v}{g} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} (h + \bar{F}) + \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial t^2} \bar{S} \right] &= 0; \quad \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} - \frac{v}{g} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} (h + \bar{F}) + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial t^2} \bar{S} \right] = 0; \\ N_x R_x + N_y R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial w}{\partial x} + N_{xy} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial w}{\partial y} + N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q - \frac{v}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} (h + \bar{F}) &= 0; \quad (2) \\ \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x - \frac{v}{g} \left[\frac{\partial^2 \psi_x}{\partial t^2} \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \bar{S} \right] &= 0; \\ \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y - \frac{v}{g} \left[\frac{\partial^2 \psi_y}{\partial t^2} \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \bar{S} \right] &= 0. \end{aligned}$$

Из этих уравнений можно легко получить соотношения для гладких или подкреплённых кольцевыми ребрами оболочек [14].

Для интегрирования уравнений (2) применяется явная конечно-разностная схема, использованная и подробно описанная в [14].

Краевые и начальные условия. При решении задач взаимодействия краевые условия разбиваются на специальные и общие. Специальные граничные условия учитывают способ закрепления конструкции, условия на бесконечности, на свободных и неподвижных поверхностях и т.д. Общие краевые условия записываются в точках поверхности контакта оболочки и жидкости.

Специальные граничные условия для рассматриваемой гидроупругой системы определяются заданием:

- а) жесткого защемления края оболочки;
- б) условия симметрии в сечениях оболочки $y=0$ и $x=0$ (рассматривается $\frac{1}{4}$ часть оболочки);
- в) условия покоя жидкости на бесконечности.

Для идеальной жидкости имеется четыре общих краевых условия:

- а) кинематическое, выражающее равенство нормальных составляющих скоростей деформируемого тела и жидкости в точках поверхности контакта;
- б) три динамических, выражающих равенство действующей со стороны жидкости силы возникающему в теле напряжению.

При решении нестационарных задач краевые условия дополняются начальными условиями, характеризующими состояние рассматриваемой системы при $t=0$. Считаем, что в начальном моменте времени фронт волны давления достигает полюсную точку оболочки и все параметры системы, кроме давления в жидкости, невозмущенными.

Структура и организация ППП. Задача, решаемая с помощью данной ППП, определена на некоторой ограниченной одномерной области с плоской и цилиндрической симметрией – расчетной области. Расчетная область представляет собой совокупность подобластей, однородных по своим физико-механическим свойствам, разделенных контактными границами. Расчет подобластей и контактных границ на одном шаге по времени осуществляется специализированными модулями – базовыми модулями, иницируемыми из единого

управляющего модуля. Базовые модули реализованы для каждой математической модели, входящей в состав функционального наполнения ППП (жидкость, ребристая оболочка) и контактных границ. Последняя версия ППП содержит 5 базовых модулей.

Иерархическая схема пакета включает в себя модули 4 уровней. Головной программой (модулем первого уровня) является управляющая программа, построенная по блочному принципу. Каждой модели и контактной границе соответствует блок в головной программе, из которого происходит обращение к соответствующему базовому модулю (модулю второго уровня). Вся информация, необходимая для работы базового модуля, сведена в единый информационный файл. Информационные файлы образуют в совокупности базу данных (БД) задачи. Пакет программ реализован на языке Паскаль. Способ построения ППП позволяет достаточно простыми средствами наращивать его возможности за счет подключения новых базовых модулей. Для этого необходимо дописать в головной программе блок обращения к новому модулю и добавить блок в модуль обмена информацией между информационными файлами.

3. Результаты и обсуждение

С целью проверки работоспособности ППП и оценки достоверности численных решений проведена серия тестовых расчетов, результаты которых сопоставлены с известными аналитическими и численными данными.

1. *Гладкая оболочка при импульсном нагружении.* Целью расчетов являются обоснование точности и устойчивости процесса численного интегрирования уравнений движения оболочки. Аналитическое исследование точности численного решения задач динамики оболочек сопряжено с преодолением больших математических трудностей. На практике для оценки точности решения применяются более простые подходы, основанные, например, на сопоставлении результатов, полученных по разным численным схемам.

Ниже путем численного эксперимента исследуется точность решения задачи об импульсном деформировании жестко защемленного упругого сферического купола. Используются две модели оболочек и три численные схемы. На основании сравнительного анализа результатов даны практические рекомендации по повышению точности расчетов.

Основные уравнения и алгоритмы расчетов. При изучении оболочек будем исходить из моделей Кирхгофа-Лява и Тимошенко.

1. Модель *Кирхгофа-Лява.* Поведение купола рассмотрим на основе алгоритма Н.В. Валишвили, описанного в [14]. Согласно этого алгоритма, уравнения движения оболочки запишем в виде

$$\ddot{w} = -(w'')'' - 2w'''/r + w''/r^2 - w'/r^3 - \Phi(1-w'')/r - \Phi'(1-w'/r) - 4P; \\ \Phi'' + \Phi'/r - \Phi/r^2 = w'(1-w'/r^2). \quad (3)$$

Более подробное описание рассматриваемой модели содержится в [14].

2. Модель *Тимошенко.* Для получения уравнений движения в формулах (2) осуществляем переход от декартовой системы координат к полярной и выбрасываем члены, соответствующие ребрам [14]:

$$(N_{1r})' - N_2 = r\rho h\ddot{u}; \quad (rQ)' + [rN_1(w' + r/R)]' = r\rho h\ddot{w} - rP; \\ (rM_1)' - M_2 - rQ = r\rho h^3\ddot{\psi}/12, \quad (4)$$

Опишем кратко два алгоритма расчета оболочки.

Первый алгоритм основан на представлении уравнений (4) в перемещениях

$$u + u'/r - u/r^2 - (1+\nu)w/R + w'w'' + \\ + (1-\nu)(w')^2/(2r) = (1-\nu^2)\rho\ddot{u}/E; \\ k^2(1-\nu)(w'' + w/r + \psi' + \psi/r)/2 - 2(1+\nu)w/R^2 + \\ + 2[z_1 + (w')^2/2]/R + (w'' + w'/r)[z_1 - (1+\nu)w/R + \\ + (w')^2/2] + (w' + r/R)[z_1' - (1+\nu)w/R + w'w''] = \\ = (1-\nu^2)(\rho\ddot{w} - P/h + \rho\delta\dot{v})/E; \\ \psi'' + \psi'/r - \psi/r^2 - 6k^2(1-\nu)(w' + \psi)/h^2 = \rho(1-\nu^2)\ddot{\psi}/E,$$

где $z_1 = u' - \nu u/r$. Решение уравнений (5) ищем на основе явной трехслойной схемы вида

$$V_i^{m+1} = 2V_i^m - V_i^{m-1} - \mu(V_i^m - V_i^{m-1}) + \\ + \tau^2 F_1(u_i^m, w_i^m, \psi_i^m, p_i^m), \quad (6)$$

где V_i^m - вектор с компонентами $u_i^m, w_i^m, \psi_i^m, p_i^m$; F_1 - вектор-функция от V_i^m, p_i^m . Схема (6) следует из (5) после замены в последней производных центральными разностями. Граничные условия аппроксимировались со вторым порядком точности.

Уравнения (4) можно интегрировать без перехода к виду (5), если воспользоваться разностной схемой, реализованной в [14]:

$$V_i^{m+1} = 2V_i^m - V_i^{m-1} - \mu(V_i^m - V_i^{m-1}) + \\ + \tau^2 F_2(N_{1,i\pm 1/2}^m; N_{2,i\pm 1/2}^m; Q_{2,i\pm 1/2}^m; M_{1,i\pm 1/2}^m; M_{2,i\pm 1/2}^m; P_i^m).$$

Результаты расчетов. Исследуем точность описанных выше схем на примере оболочки, для которой $E=7,56 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; $\rho = 2,64 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\nu = 0,3$ (алюминий); $R=76,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h=0,763 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $R_0=14,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

В начальный момент времени оболочка считается неподвижной, при $t=0$ на нее начинает действовать внешнее давление постоянной интенсивности 4,64 МПа. Оболочка и нагружение соответствуют рассмотренным в [14].

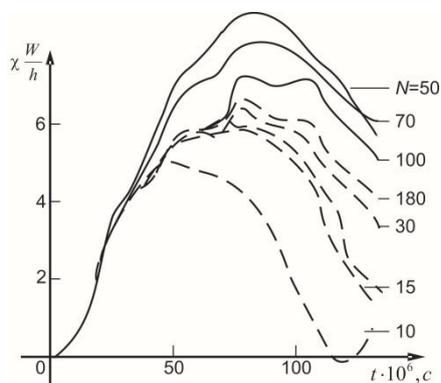


Рис. 1. Сравнение прогибов полюса оболочки, рассчитанных для разных чисел N разбиений с тестом

На рис.1 представлены результаты расчетов по разностной схеме (6) (сплошные кривые) и (7) (штриховые кривые), проведенных для различных значений N (N -количество разбиений оболочки). По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной безразмерный прогиб полюсной точки оболочки. Штрихпунктирная кривая рассматривается как тестовая. Она построена по результатам Н.В. Валишвили и получена из работы [14].

Как видно, разностная схема (6) дает решение, медленно сходящееся к тестовому при дроблении сетки, вместе с тем схема (7) обеспечивает удовлетворительную точность при $N=15$. Дополнительные расчеты подтвердили высокую точность и экономичность схемы (7). В частности, была рассмотрена оболочка, на которую действует внешнее давление, изменяющееся по времени по закону $P=\alpha t$. Здесь P и t - безразмерные величины [14]. Расчеты, проведенные при $N=15$ и $\alpha = 0,25; 5; 10$, показали хорошее соответствие прогибов, рассчитанных по алгоритму (7), и алгоритму Н.В. Валишвили, причем алгоритм (7), основанный на уравнениях Тимошенко, позволил рассчитывать прогиб в большем интервале времени, чем алгоритм, разработанный Н.В.Валишвили на основе уравнений (3).

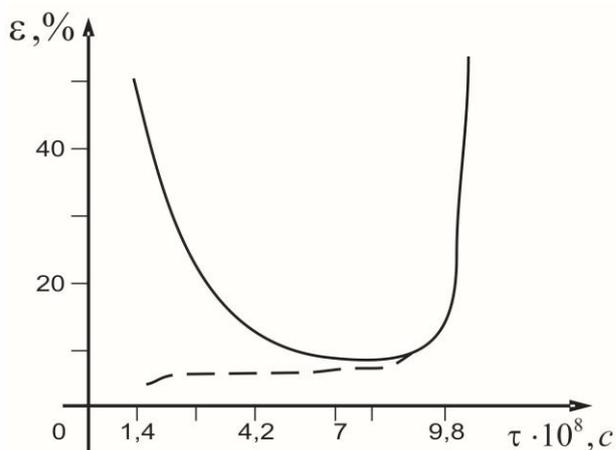


Рис. 2. Отклонение решений теста при различных значениях шага

При программной реализации алгоритма (7) данные в памяти ЭВМ представлялись в двойной точности. Это позволило существенно повысить точность и устойчивость вычислений. На рис.2 приведены в процентном соотношении отклонения решений от теста при различных значениях шага по времени. Сплошная кривая построена по результатам расчетов с одинарной точностью, а штриховая - с двойной. Число разбиений по радиусу равнялось 30. По условию Куранта, устойчивость вычислений по явной разностной схеме обеспечивается при $\tau \leq \tau_{кр}$. Но, как видно из рисунка, при одинарной точности устойчивость сохраняется

только в интервале $\tau \approx (0,55 \dots 0,90) \cdot \tau_{\text{куп}} (\tau_{\text{куп}} \approx 9,3 \cdot 10^{-8} \text{ с})$, а при $\tau < 0,55 \cdot \tau_{\text{куп}}$ она теряется. Расчеты с двойной точностью позволяют сохранить устойчивость при $\tau \ll \tau_{\text{куп}}$.

По результатам расчетов можно сформулировать следующие выводы:

- разностная схема (7), в которой перемещения и углы поворота находятся в узлах сетки, а значения деформаций, усилий и моментов – в центрах элементов, обеспечивает большую точность и эффективность расчетов, чем схема (6), основанная на нахождении всех величин в узлах;

- описание данных с двойной точностью позволяет существенно расширить интервал допустимых значений шага по времени, повысить точность и устойчивость вычислений.

2. *Нестационарное взаимодействие оболочки с жидкостью.* Расчеты проводили при следующих геометрических и механических характеристиках сферической полой оболочки (купола): $h=1 \text{ см}$; $R=2\text{м}$; $R_0=0,5\text{м}$; $E=75600\text{МПа}$; $\nu = 0,3$; $\rho_0 = 2640 \text{ кг/м}^3$. Плоскую волну давления в жидкости задавали в следующем виде

$$P = P_0 \cdot e^{-\left(t/\alpha + X_p/(a_0\alpha)\right)} \cdot H\left(t/\alpha + X_p/(a_0\alpha)\right), \quad (8)$$

где $H(\dots)$ – функция Хевисайда; P_0 и α – константы, определяющие амплитуду и длительность импульса соответственно; $a_0=1500\text{м/с}$ – скорость звука в жидкости; $X_p = r \sin \theta - R$. Во всех расчетах принимали $P_0=8 \text{ МПа}$ и $\alpha=10^{-3} \text{ с}$.

Было проведено исследование взаимодействия подводной волны с оболочкой путем постепенного усложнения модели купола. Купол последовательно рассматривался как недеформируемое тело, гладкая оболочка и подкрепленная с кольцевыми или перекрестными ребрами оболочка.

Расчеты проводились в предположении абсолютной жесткости оболочки, а также для оболочек различной толщины. На рис.3 представлены результаты для момента времени $t = 75 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

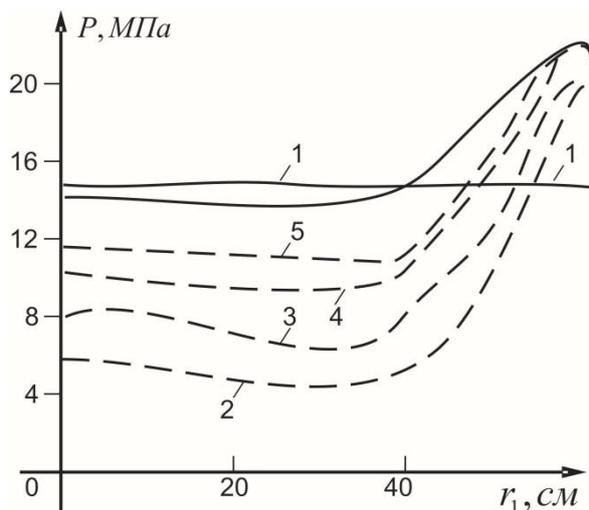


Рис. 3. Распределение давления по поверхности абсолютно жесткой (сплошные) и деформируемой (штриховые) оболочек: 1-тест; 2- $h=2,07 \text{ см}$; 3- $h=3,14 \text{ см}$; 4- $h=5 \text{ см}$; 5- $h=8 \text{ см}$.

В случае абсолютно жесткой оболочки поле давлений сравнивалось с тестом. В качестве тестовых использовались результаты, полученные Э. И. Григолоюком и А. Г. Горшковым. Как видно, в центральной части оболочки, где ее поверхность близка к плоской, результаты хорошо согласуются с тестовыми. Значительное отличие указанных данных вблизи кромок объясняется тем, что в этой зоне течение жидкости имеет сложный характер, и упрощенный подход не может обеспечить достаточную точность при вычислении давления.

Расчеты с учетом деформируемости оболочки показали, что давление на ее поверхности меняется достаточно плавно и существенно зависит от толщины оболочки. При увеличении h результаты расчетов приближаются к данным, полученным для абсолютно жесткого тела.

4. Заключение

Использование разностной схемы, в которой перемещения и углы поворота находятся в узлах сетки, а значения деформаций, усилий и моментов – в центрах элементов, обеспечивает большую точность и эффективность расчетов, чем схема, основанная на нахождении всех величин в узлах. Описание данных с двойной точностью при расчетах оболочки типа Тимошенко позволяет существенно расширить интервал допустимых значений шага по времени, повысить точность и устойчивость вычислений. В расчетах нестационарного взаимодействия жидкости и оболочки давление на поверхности контакта меняется достаточно

плавно и существенно зависит от толщины оболочки. При увеличении толщины результаты расчетов приближаются к данным, полученным для абсолютно жесткого тела.

В целом, на основе анализа результатов тестовых расчетов можно утверждать, что разработанный пакет прикладных программ обеспечивает достаточную точность и достоверность вычислений.

Список литературы

1. Smerdov A. A. A computational study in optimum formulations of optimization problems on laminated cylindrical shells for buckling II. Shells under external pressure. *Composites Science and Technology*. 2000. Vol. 60, no. 11. Pp. 2067–2076.
2. Lutskaya I. V., Maksimyuk V. A., Storozhuk E. A., Chernyshenko I. S. Nonlinear elastic deformation of thin composite shells of discretely variable thickness // *International Applied Mechanics*. 2016. Vol. 52, no. 6. Pp. 616–623.
3. Leonenko D. V., Starovoitov E. I. Vibrations of cylindrical sandwich shells with elastic core under local loads // *International Applied Mechanics*. 2016. Vol. 52, no. 4. Pp. 359–367.
4. Kopecki T., Świąch Ł. Experimental and numerical analysis of post-buckling deformation states of integrally stiffened thin-walled components of load-bearing aircraft structures // *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2014.
5. Krivoshapko S.N. Research on General and Axisymmetric Ellipsoidal Shells Used as Domes, Pressure Vessels, and Tanks // *Applied Mechanics Reviews*. 2007. Vol. 60, no. 6. Pp. 336–355.
6. Kondratyeva L. N., Routman Y. L., Maslennikov A. M., Golykh O. V. Analytical Method of Determining Folded Depressed Shells Free Oscillation Frequency. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1020. Pp. 291–296.
7. Wang B., Du K., Hao P., Zhou C., Tian K., Xu S., Ma Y., Zhang X. Numerically and experimentally predicted knockdown factors for stiffened shells under axial compression // *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 109. Pp. 13–24.
8. Duc N. D. Corrigendum to “Nonlinear dynamic response of imperfect eccentrically stiffened FGM double curved shallow shells on elastic foundation” [*Compos. Struct.* 99 (2013) 88–96]. *Composite Structures*. 2013. Vol. 102. Pp. 306–314.
9. Bich D.H., Dung D.V., Nam V.H. Nonlinear dynamic analysis of eccentrically stiffened imperfect functionally graded doubly curved thin shallow shells. *Composite Structures*. 2013. Vol. 96. Pp. 384–395.
10. Mouhat O., Khamlichi A. Effect of loading pulse duration on dynamic buckling of stiffened panels // *MATEC Web of Conferences*. 2014. Vol. 16. P. 07006.
11. Yu W., Li Z.L. Structural Similitude for Prestressed Vibration and Buckling of Eccentrically Stiffened Circular Cylindrical Panels and Shells by Energy Approach // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2016. Vol. 16, no. 10. Pp. 1550074.
12. Hao P., Wang B., Tian K., Liu H., Wang Y., Niu F., Zeng D. Simultaneous buckling design of stiffened shells with multiple cutouts // *Engineering Optimization*. 2017. Vol. 49, no. 7. Pp. 1116–1132.
13. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // *Вычислительные методы в гидродинамике*. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
14. Холмуродов Р.И., Каршиев А.Б. Расчет элементов конструкций с нарушениями регулярности структуры. Ташкент: Изд-во имени Абу Али ибн Сино, 2002.

УДК 539.3

Сейсмодинамика сложных систем трубопроводов по записи реального землетрясения Seismodynamics of complex pipeline systems by a real earthquake record

И. Мирзаев¹, Э. А. Косимов², Н. А. Нишоннов², Е. В. Ан²

¹*Ташкентский Государственный Транспортный Университет, г. Ташкент, Узбекистан*

²*Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан*

I. Mirzaev¹, E. A. Kosimov², N. A. Nishonov², E. V. An²

¹*Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan*

²*Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T. Urazbayev of the AS RUz, Tashkent, Uzbekistan*

Аннотация. Исследована динамика подземной сложной системы трубопроводов с разными углами ответвления при воздействии трехкомпонентной сейсмической волны. Применяются конечно-элементная дискретизация и неявный метод конечных разностей по времени. Разработан вычислительный алгоритм и создан программный комплекс для решения класса задач сейсмодинамики сложных подземных трубопроводных систем разной конфигурации. Определено влияние угла ответвления на напряженно-

деформированное состояние стальной крестообразной системы трубопроводов во время землетрясения Газли (1976). Результаты представлены в виде графиков распределения напряжений по времени.

Ключевые слова: крестообразная система подземных трубопроводов с разными углами ответвления, реальные записи землетрясения, напряжения, метод конечных элементов и метод конечных разностей, программный комплекс.

Abstract. The dynamics of the underground pipeline systems with different branch angles under the influence of the three component seismic wave is studied. Finite element discretization and implicit finite difference method over time are used. To solve the class of problems of seismodynamics of complex underground pipeline systems of various configurations, the computational algorithm is developed and the software package is created. The influence of the branch angle on the stress strain state of steel continuous cruciform pipelines during the Ghazli earthquake (1976) is determined. The results are presented in the form of stress distribution graphs over time.

Keywords: cruciform underground pipeline with different branch angles, real earthquake records, stresses, finite element method and finite difference method, software package.

I. Введение

Подземные трубопроводы уязвимы к повреждениям от землетрясений, которые наблюдались и документировались при произошедших землетрясениях в разных странах мира [1, 2]. Одним из примеров является землетрясение в Газли 1976 г. (Узбекистан), интенсивность которого была 9 баллов по шкале MSK-64. Оно серьезно повредило трубопроводы во всем городе, наблюдались трещины в водопроводной сети, в том числе разрушение сварного соединения прямолинейного участка стальной водопроводной трубы диаметром 1.02 м и толщиной 0.008 м [3].

В реальности подземная трубопроводная сеть состоит из разветвляющихся подземных трубопроводов с различными соединениями, соединяющихся с колодцем и между собой ортогонально и неортогонально. Соединения изменяют геометрию и жесткость трубопроводной конструкции и влияют на напряженно-деформированное состояние трубопроводной сети.

В Узбекистане первые исследования по изучению напряженно-деформированного состояния трубопроводной системы были проведены в рамках сейсמודинамической теории подземных сооружений в работе [4]. На сегодняшний день эта теория продолжает развиваться, а ее основополагающие идеи и методы стали классическими. В целом, на сегодняшний день, сейсмостойкость трубопроводных систем достаточно хорошо изучена, но ранее не было выявлено влияния угла ответвления в сложных системах подземных трубопроводов на их сейсмонапряженное состояние.

Данная статья посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния подземной крестообразной системы стальных трубопроводов при действии сейсмических трехкомпонентных волн, распространяющихся в грунте, по инструментальным записям землетрясения Газли. Для решения подобных задач требуется усовершенствовать методики расчета и с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и метода конечных разностей (МКР) разработать алгоритмы и программу расчета, позволяющая учесть совместные продольные и поперечные колебания крестообразной системы трубопроводов при действии сейсмической нагрузки, а также различные механические и геометрические параметры конструкции.

Существуют готовые программные пакеты для выполнения инженерно-вычислительных работ, используемые при решении множества современных инженерных задач, такие как ANSYS – ANSYS Inc, LS-DYNA, ABAQUS (США), ЛИРА–САПР (Украина, Россия), SOFiSTiK AG (США), SCAD Office (Россия). Эти прикладные программные пакеты можно рассматривать как интегрированные программные пакеты, основанные на МКЭ [5-7].

Важной особенностью алгоритмов решения сложных задач МКЭ для численного исследования сейсמודинамики подземных трубопроводов под воздействием трехкомпонентных сейсмических волн заключается в том, что воздействие, распространяющееся в грунте, на крестообразную конструкцию передается через торцы и боковые поверхности трубопроводов. Поэтому, возникает необходимость в создании программного обеспечения, позволяющего решить поставленную задачу расчета сложной крестообразной системы подземных трубопроводов с учетом воздействия в виде сейсмограммы реальной записи землетрясения Газли.

II. Постановка задачи

Для численного решения класса задач сейсמודинамики пространственных систем подземных трубопроводов при их дискретизации удобным методом является МКЭ. Подземную конструкцию разбиваем на

конечные элементы, строим матрицы масс, жесткостей, взаимодействия и демпфирования для линейного конечного элемента, узлового элемента и собираем матрицы для подземной конструкции в целом. Причем каждый трубопроводный элемент имеет свои массовые, жесткостные и вязкие параметры, в том числе параметры грунта.

Пространственную систему подземных трубопроводов, взаимодействующих с грунтом, можно разделить на линейные участки трубопровода, массивные узлы и стыковые соединения [8].

Для получения матриц жесткостей и масс используем принцип возможных перемещений

$$\delta A - \delta A_1 - \delta A_2 = 0$$

где δA , δA_1 , δA_2 - виртуальная работа сил упругости трубопроводного или стыкового конечного элемента; виртуальная работа распределенных сил инерций, сил взаимодействия с грунтом и внешних распределенных сил; виртуальная работа сил реакций на торцах трубопроводного конечного элемента [9].

Конструкция состоит из стержневых и стыковых конечных элементов, взаимодействующих с грунтом, которые можно собрать в пространственную крестообразную систему подземных трубопроводов при разных углах ответвления. Стыковые соединения приняты жесткими. При этом граничные условия на конечных точках трубопроводной системы заданы закрепленными к грунту. Эти условия так же охватываются приведенными конечными элементами. Система уравнений движения подземной трубопроводной системы после конечно-элементной дискретизации в общем виде записывается следующим образом

$$[M_p]\{\ddot{U}\} + [C_p]\{\dot{U}\} + [K_p]\{U\} + [C_v](\{\dot{U}\} - \{\dot{U}_0\}) + [K_v](\{U\} - \{U_0\}) = \{F(t)\} \quad (1)$$

Здесь $[M_p]$ - матрица масс, $[K_p]$ - матрица жесткостей, $[C_p]$ - матрица демпфирования, $[K_v]$ - матрица взаимодействия, $[C_v]$ - матрица вязкого взаимодействия, $\{F\}$ - вектор воздействий, $\{U_0\}$ - сейсмическая волна в виде сейсмограмм реальных записей землетрясений, зависящая от координаты и времени. Матрица демпфирования строится в виде $[C_p] = \alpha[M_p] + \beta[K_p]$ [10].

Граничные условия задаются в виде полного (три перемещения и три поворота) закрепления к грунту;

Начальные условия имеют вид

$$\{U\} = \{U_{CT}\}, \quad \{\dot{U}\}^0 = 0, \quad (2)$$

где $\{U_{CT}\}$ - решение статической задачи.

III. Теория

Для определения начальных условий решается задача статики при заданных внешних силах и перемещениях некоторых узлов.

$$([K_p] + [K_v])\{U_{CT}\} = \{F\}.$$

Для решения системы алгебраических уравнений применяется метод Холесского при профильном хранении матрицы жесткости пространственной системы подземного трубопровода [11].

Опишем численный метод решения уравнений сейсродинамики пространственных систем подземных трубопроводов.

Для решения системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (1) с начальными условиями (2) используем неявную аппроксимацию системы конечными разностями [10]

$$\begin{aligned} & \frac{[M_p]}{\tau^2} (\{U\}^{n+1} - 2\{U\}^n + \{U\}^{n-1}) + \frac{[C_p]}{2\tau} (\{U\}^{n+1} - \{U\}^{n-1}) + \\ & + \frac{[K_p]}{2} (\{U\}^{n+1} + \{U\}^{n-1}) + \frac{[C_v]}{2\tau} (\{U\}^{n+1} - \{U_0\}^{n+1} - \{U\}^{n-1} + \{U_0\}^{n-1}) + \\ & + \frac{[K_v]}{2} (\{U\}^{n+1} - \{U_0\}^{n+1} + \{U\}^{n-1} - \{U_0\}^{n-1}) = \frac{1}{2} (\{F\}^{n+1} + \{F\}^{n-1}). \end{aligned}$$

где τ - шаг по времени; верхний индекс n - номер шага по времени.

Максимальное нормальное напряжение в поперечном сечении трубопровода вычисляется по формуле

$$\sigma_{\max} = \sigma_n + \text{sign}(\sigma_n) \sqrt{(M_z \cdot D_H / (2 \cdot J_z))^2 + (M_y \cdot D_H / (2 \cdot J_y))^2},$$

при этом в разное время максимальное нормальное напряжение получается у наружного диаметра в разных точках поперечного сечения.

Для проведения расчетов разработан комплекс программ исследования сейсродинамики сложных подземных трубопроводов, предназначенный для автоматизации решения задач, относящихся к одному классу [12-13].

В качестве воздействия выбраны трехкомпонентные осциллограммы записи реального землетрясения Газли (Узбекистан). Оценку сейсродинамики можно проводить на графических представлениях по максимальным значениям нормального к поперечным сечениям напряжения в трубопроводах. Направление распространения сейсмических волн при землетрясении в Газли составляло 30° – 40° относительно оси координат OX [3].

В качестве примера были исследованы сейсродинамические процессы крестообразной конфигурации трубопроводной системы с разными углами ответвления, каждый линейный трубопровод имеет длину 100 м и свой диаметр (рис.1). Ось OX совпадает с первым трубопроводом, диаметр которого $D_{N1}=0.53$ м, а ось OY – со вторым трубопроводом, диаметр которого $D_{N2}=0.219$ м.

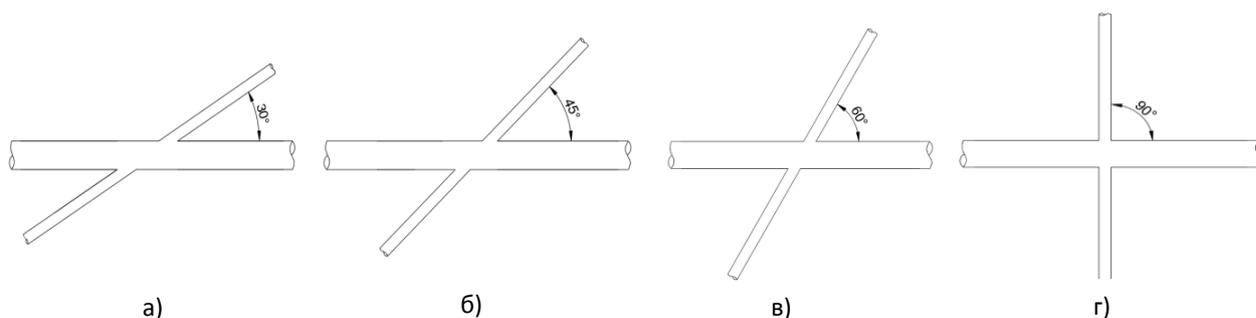


Рис. 1. Сложные конфигурации трубопроводных систем

IV. Результаты экспериментов

Механические и геометрические параметры крестообразной системы трубопроводов представлены следующим образом: $E=2 \cdot 10^5$ МПа; $\rho=7.8 \cdot 10^3$ кг/м³; $l_1=100$ м; $D_{N1}=0.53$ м; $D_{V1}=0.516$ м; $l_2=100$ м; $D_{N2}=0.219$ м; $D_{V2}=0.213$ м; $C_{p1}=500$ м/с; $C_{p2}=1000$ м/с; $k_x=1 \cdot 10^4$ кН/м³;

В рассматриваемой задаче исследовано напряженно-деформированное состояние с учетом воздействия в виде трехкомпонентных сейсмических волн на сложную крестообразную систему подземных трубопроводов с разными углами ответвления (рис. 2 – 5).

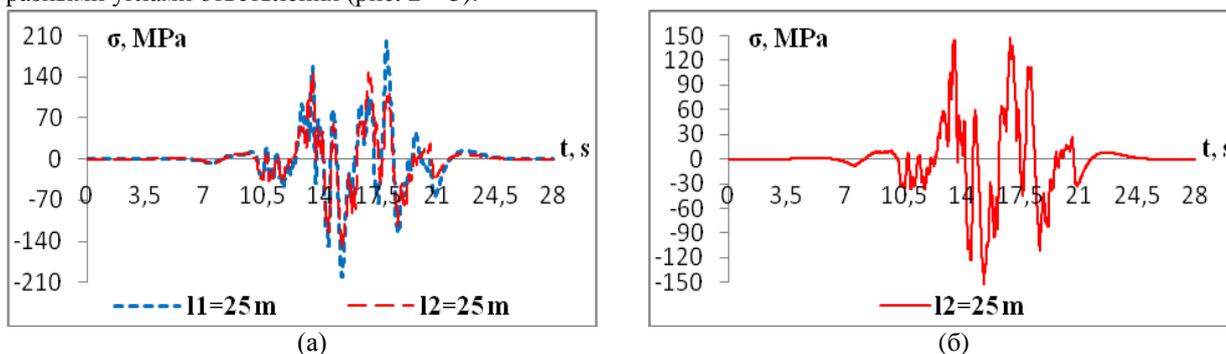


Рис. 2. Изменение по времени максимальных нормальных напряжений: а – в первом и втором трубопроводах, соединенных под углом 30° С (см. рис. 1, а); б – во втором трубопроводе

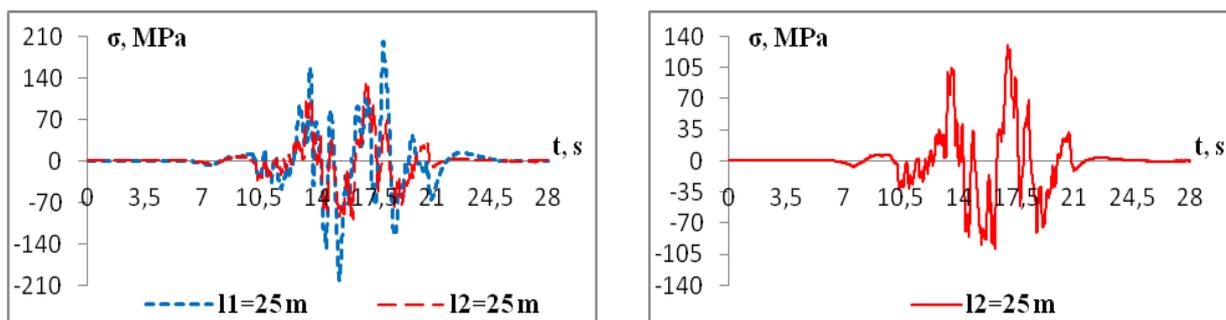


Рис. 3. Изменение по времени максимальных нормальных напряжений: *a* – в первом и втором трубопроводах, соединенных под углом 45°С (см. рис. 1, *b*); *b* – во втором трубопроводе

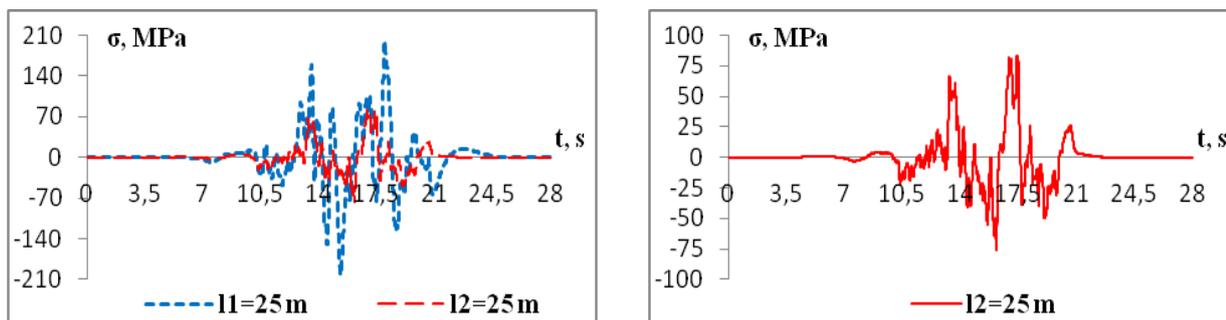


Рис. 4. Изменение по времени максимальных нормальных напряжений: *a* – в первом и втором трубопроводах, соединенных под углом 60°С (см. рис. 1, *b*); *b* – во втором трубопроводе

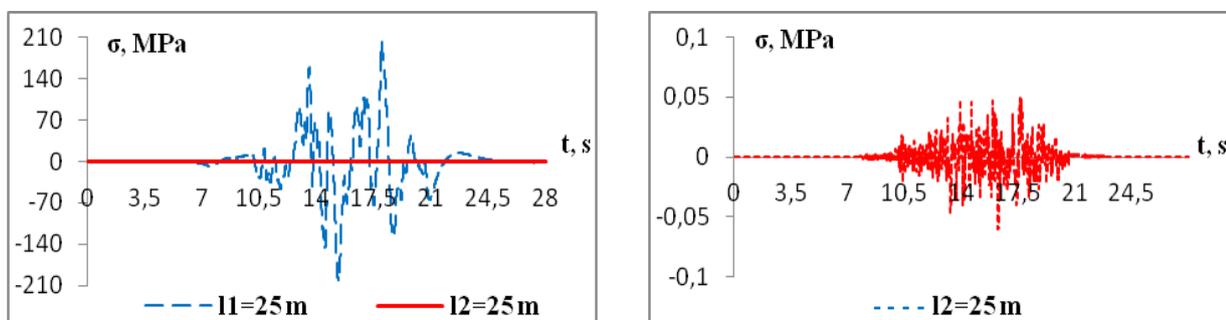


Рис. 5. Изменение по времени максимальных нормальных напряжений: *a* – в первом и втором трубопроводах, соединенных под углом 90°С (см. рис. 1, *z*); *b* – во втором трубопроводе

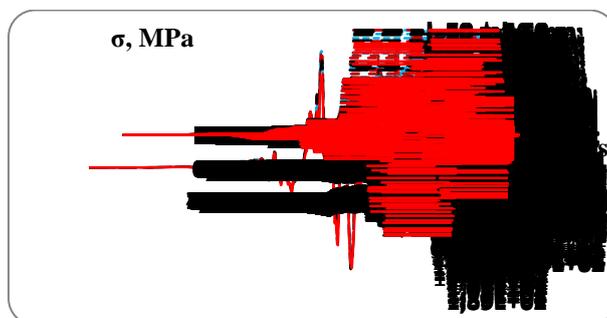


Рис. 6. Изменение по времени максимальных нормальных напряжений в стыковом соединении первого и второго трубопроводов

V. Обсуждение результатов

На рис. 2 – 4 показаны изменения по времени максимальных нормальных напряжений крестообразной системы трубопроводов. Из графиков видно, что по мере увеличения угла ответвления от 30° до 60° значения напряжения первого трубопровода изменяются незначительно в районе 200 МПа, а значения напряжения второго трубопровода уменьшаются с 150 до 90 МПа.

Из рис. 5 видно, что если сейсмическое воздействие действует параллельно оси первого трубопровода, то напряжения в первом трубопроводе большого диаметра при крестообразном соединении под углом 90° намного превышают напряжения во втором трубопроводе малого диаметра, при этом значения напряжений во втором трубопроводе малого диаметра незначительны. Этот эффект связан с тем, что труба малого диаметра перпендикулярна направлению распространения сейсмической волны, а небольшие колебания связаны с крестообразным соединением труб. Поэтому, когда сейсмическая волна действует параллельно к оси первого

трубопровода влияние поперечной трубы можно не учитывать, что согласуется с результатом, полученным в монографии [4].

Как видно из графиков на рис. 6, значения максимальных нормальных напряжений в стыковом соединении трубопроводов не зависят от угла ответвления. Вне зависимости от угла соединения в зоне пересечения первого и второго трубопроводов значения напряжений больше, чем в других точках крестообразной конструкции.

Так как трубопровод был изготовлен из марки стали Ст.3 с пределом упругости 170...220 МПа, то вычисленные численным методом значения напряжения 203 МПа для линейной задачи на основе инструментальной записи Газли позволяют сделать заключение о возможности разрушения трубопровода в результате данного землетрясения, что согласуется с данными последствий этого землетрясения [3].

VI. Выводы и заключение

В статье исследовано напряженно-деформируемое состояние крестообразной системы трубопроводов с разными углами ответвления, подвергающейся действию трехкомпонентной сейсмической волны, зарегистрированной во время землетрясения в городе Газли (Узбекистан) в 1976 г. На основе МКЭ и МКР составлен вычислительный алгоритм и разработана программа расчета, учитывающая совместные продольные и поперечные колебания первого и второго трубопроводов, при действии сейсмической нагрузки, а также различные механические и геометрические параметры.

Приведены графики изменения по времени значений напряжений, возникающие в первом и во втором подземных трубопроводах, а также в точке пересечения этих трубопроводов в виде сложной крестообразной конфигурации, имеющей разные углы ответвления.

Было обнаружено, что напряжения, возникающие в первом трубопроводе большого диаметра при действии сейсмической волны параллельной оси первого трубопровода, намного превышают напряжения во втором трубопроводе малого диаметра.

Получено, что значения напряжения второго трубопровода зависят от угла ответвления, с увеличением последнего, значения напряжений приближаются к нулю, а в первом трубопроводе – остаются практически неизменными.

Результаты показывают, что при крестообразном соединении трубопроводов под углом 90° значения напряжений во втором трубопроводе незначительны, так как этот трубопровод имеет малый диаметр и перпендикулярен направлению распространения сейсмической волны. Небольшие его колебания связаны с соединением труб между собой в крестообразную конфигурацию.

Отмечено, что при действии сейсмической волны параллельно к оси первого трубопровода влияние поперечной трубы можно не учитывать.

Также выявлено, что максимальные значения напряжений вне зависимости от угла ответвления достигаются на пересечении первого и второго трубопроводов.

Установлено, что полученные результаты хорошо согласуются с данными произошедшего Газлийского землетрясения 1976 года, а также совпадают с выводами других авторов из ранее проведенных исследований.

Список литературы

1. O'Rourke M. J. and Liu X. *Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines* // Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2012.
2. O'Rourke T. D., Jeon S. S., Toprak S. et al., *Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ* // *Earthquake Spectra*. 2014. Vol. 30, no. 1. Pp. 183–204.
3. Газлийские землетрясения 1976 г. Инженерный анализ последствий. М.: Наука, 1982. 196 с.
4. Рашидов Т. Р. Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. // Ташкент: Фан, 1973. 180 с.
5. Feng W., Yurong MA., Yaqiong J., Dan Li., Haifei L. Application of ansys finite element analysis in teaching of mechanics of materials // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 198. P. 01049. DOI:10.1051/e3sconf/202019801049.
6. Abaqus. *Getting Started with Abaqus* // Interactive Edition. 2008.
7. Romashkina M. A., Titok V. P. *LIRA-SAPR software complex*. 2018. P. 254.
8. Kosimov E. A., Mirzaev I. and Bekmirzaev D. A. Comparison of the impacts of harmonic and seismic waves on an underground pipeline during the Gazli earthquake // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1030. P. 012082.
9. Zienkiewicz O. C. *The finite element method* // 3-rd edition-New York: McGraw-Hill, 1977.
10. Zienkiewicz O. C., Morgan K. *Finite elements and approximation* // A Wiley-Interscience Publication, New York, 1983.

11. George A. and Liu J. Computer Solution of large Sparse Positive Definite Systems // Prentice-Hall, New Jersey, 1981.
12. Mirzaev I., Kosimov E. Automation of seismodynamics study of spatial systems of underground pipelines by real earthquake records // Modern problems of applied mathematics and information technologies. Al-Khwarizmi 2021, 15-17 November. 2021.
13. Мирзаев И., Нишонов Н., Косимов Э. Автоматизация решения задач сейсродинамики подземных трубопроводов при сейсмическом воздействии // Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта: Республиканская научно-техническая конференция /Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада Аль-Хорезми, 26-27 октября 2022. С. 257–261.

УДК 378:004

Исследование влияния цветовых параметров на восприятие ковровых дизайнов с использованием фрактальных изображений.
Study of the influence of color parameters on the perception of carpet designs using fractal images.

Ф. М. Нуралиев, Н. Эгамбердиев, С. А. Тастанова
Ташкентский Университет информационных Технологий, г. Ташкент, Узбекистан

F. M. Nuraliev, N. Egamberdiyev, S. A. Tastanova
Tashkent University of Information Technologies, Tashkent, Uzbekistan

Аннотация. Данная статья посвящена разработке алгоритмов оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров с использованием генетического алгоритма и метода оптимизации симплекс, а также классификации цветов фрактальных структур в ковровом дизайне с помощью нейронной сети. Мы представили общую теорию фрактальных структур и методы их моделирования, а также описали алгоритмы оптимизации цветовых параметров, основанные на генетическом алгоритме и методе оптимизации симплекс. Были проведены эксперименты с использованием обоих алгоритмов и получены результаты, которые показали эффективность этих методов в оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров. Кроме того, мы рассмотрели классификацию цветов фрактальных структур в ковровом дизайне с использованием нейронной сети и показали, что этот метод может быть успешно применен для автоматической классификации цветов фрактальных структур в ковровом дизайне. В целом, наши результаты представляют собой важный шаг в развитии методов оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров и их классификации с помощью нейронных сетей.

Ключевые слова: фракталы, оптимизация, генетический алгоритм, метод оптимизации симплекс, нейронные сети, цветовая классификация.

Abstract. This article is devoted to the development of algorithms for optimizing the color parameters of fractal images of carpets using a genetic algorithm and the simplex optimization method, as well as classifying the colors of fractal structures in carpet design using a neural network. We presented the general theory of fractal structures and methods for their modeling, and also described color parameter optimization algorithms based on the genetic algorithm and the simplex optimization method. Experiments were carried out using both algorithms and results were obtained that showed the effectiveness of these methods in optimizing the color parameters of fractal images of carpets. In addition, we reviewed the color classification of fractal structures in carpet design using a neural network and showed that this method can be successfully applied to automatically classify the colors of fractal structures in carpet design. In general, our results represent an important step in the development of methods for optimizing the color parameters of fractal carpet images and their classification using neural networks.

Keywords: fractals, optimization, genetic algorithm, simplex optimization method, neural networks, color classification.

I. Введение

Фрактальные изображения являются важным инструментом в ковровом дизайне, так как они позволяют создавать красивые и уникальные узоры. Однако правильный выбор цветовых параметров и установка

параметров являются важными факторами в создании эффектных ковровых дизайнов с использованием фракталов. В данной статье мы рассмотрим разработку алгоритмов оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров с использованием генетического алгоритма и метода оптимизации симплекс, а также классификацию цветов фрактальных структур в ковровом дизайне с помощью нейронной сети.

Мы представили результаты экспериментов, которые показали эффективность предложенных алгоритмов оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров. Генетический алгоритм и метод оптимизации симплекс позволяют получить оптимальные значения цветовых параметров для создания красивых и уникальных ковровых дизайнов. Кроме того, мы провели классификацию цветов фрактальных структур с помощью нейронной сети, которая показала высокую точность при определении цветовых характеристик фрактальных изображений[1].

В заключение, наши результаты показывают, что разработанные алгоритмы могут быть использованы для создания красивых и уникальных ковровых дизайнов с использованием фракталов. Классификация цветовых характеристик фрактальных структур также может быть использована для создания автоматических инструментов для создания ковровых дизайнов, что позволит сократить время и усилия, затрачиваемые на создание уникальных дизайнов[2].

II. Постановка задачи

Основная задача данной работы заключается в разработке алгоритмов оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров. Для решения этой задачи будут использованы генетический алгоритм и метод оптимизации симплекс. Генетический алгоритм будет использоваться для оптимизации цветовых параметров в целом, а метод оптимизации симплекс – для оптимизации каждого цвета по отдельности.

Другая задача заключается в классификации цветов фрактальных структур в ковровом дизайне с помощью нейронной сети. Для решения этой задачи будут использованы различные методы машинного обучения, включая нейронные сети.

III. Теория

1. Оформление фрактальных изображений в ковровом дизайне.

Фрактальные изображения имеют множество цветовых комбинаций, которые могут быть использованы в ковровом дизайне. Для создания ковровых дизайнов с использованием фракталов необходимо правильно оформить изображения, подобрать цвета и установить параметры.

2. Генетический алгоритм

Классификация цветов фрактальных структур в ковровом дизайне с помощью нейронной сети

После оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров мы можем перейти к задаче классификации цветов фрактальных структур с помощью нейронной сети[3].

Для начала необходимо подготовить данные для обучения нейронной сети. Мы используем уже оптимизированные фрактальные изображения ковров с заданными цветовыми параметрами. Каждое изображение представляет собой матрицу пикселей, каждый пиксель содержит информацию о цвете в формате RGB. Таким образом, каждое изображение представляет собой вектор размерности $3N$, где N - число пикселей в изображении.

Затем мы должны разделить данные на обучающую и тестовую выборки. Обычно принято использовать 70-80% данных для обучения и 20-30% для тестирования.

После этого мы можем приступить к обучению нейронной сети. Для классификации цветов мы будем использовать многослойный перцептрон (MLP). MLP состоит из нескольких слоев, каждый из которых содержит набор нейронов. Каждый нейрон принимает на вход значения из предыдущего слоя, выполняет некоторые вычисления и передает результат следующему слою.

Для обучения MLP мы используем обратное распространение ошибки (backpropagation). Основная идея backpropagation заключается в том, чтобы на каждой итерации обучения корректировать веса нейронов, чтобы минимизировать ошибку на обучающей выборке. Для этого мы используем функцию ошибки, которая показывает, насколько сильно наша модель ошибается на каждом примере из обучающей выборки.

После обучения нейронной сети мы можем приступить к классификации цветов фрактальных структур в ковровом дизайне. Для этого мы подаем на вход нейронной сети вектор цветовых параметров фрактальной структуры, и она выдает на выходе класс, к которому относится эта структура.

Оба алгоритма оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров показали хорошие результаты в сравнении с исходным изображением. Однако, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

Генетический алгоритм показал высокую эффективность в получении оптимальных цветовых параметров, но его применение требует большого количества вычислений и времени. Также существует риск попадания в локальный оптимум при использовании этого алгоритма[4].

Метод оптимизации симплекс является более быстрым и менее затратным в вычислительном отношении. Он также может давать более точные результаты, чем генетический алгоритм, но может быть менее устойчивым к выбросам и шумам в данных.

Классификация цветов фрактальных структур в ковровом дизайне с помощью нейронной сети также показала хорошие результаты в точности классификации цветов, что может быть полезным при работе с большим количеством фрактальных изображений и цветовых комбинаций.

Таким образом, выбор алгоритма оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров зависит от требуемой точности, времени выполнения и доступных вычислительных ресурсов. Классификация цветов с помощью нейронной сети может дополнительно улучшить результаты оптимизации и сократить время работы.

В ковровом дизайне он формируется с помощью сложных фрактальных образов и параметров. Фрактальное изображение использует y_i типа цвета, из которых $i = \overline{1, p}$. В производстве ковров используются натуральные цвета. Натуральные цвета имеют x_j цены, $j = \overline{1, m}$. m количество штук в ценовом наборе натурального цвета (таблица 1). Покупатель предлагает S_{\max} и S_{\min} цен на ковер и может выбрать k цвет на фрактальном изображении, При выборе $k < p$. k значения S_{\max} и S_{\min} пересчитываются по следующим формулам.

$$F = \sum_{i=1}^{p_1} x_i y_i \rightarrow \min$$

$$x_{j_{\max}} \geq x_i \geq x_{j_{\min}}$$

$$\sum_{i=1}^{p_1} x_{i_{\min}} \leq \sum_{i=1}^{p_1} x_i \leq \sum_{i=1}^{p_1} x_{i_{\max}}$$

$$S_{\max}^1 \geq \sum_{i=1}^{p_1} x_i y_i \geq S_{\min}^1, i = \overline{1, p_1}, j = \overline{1, m}$$

$$S_{\min}^1 = S_{\min} - \sum_{l=1}^k x_l y_l, l = \overline{1, k}$$

$$S_{\max}^1 = S_{\max} - \sum_{l=1}^k x_l y_l, l = \overline{1, k}$$

Генетик алгоритм

Шаг 1. Создание нескольких популяций случайных цветных порядковых номеров и преобразование порядковых номеров в двоичную систему счисления.

Шаг 2. Кроссовер генов

Шаг 3. Мутация генов

Шаг 4. Генный отбор. Переводим появившиеся гены в десятичную систему счисления и используем полученные цифры в качестве порядкового номера окраса. Мы вычисляем значение цвета, вычисляя функции с ценами цветов. В качестве лямбда (λ) возьмем разницу средних значений каждой итерации и примем начальное значение за 1000.

Шаг 5. Если λ больше 350, повторяем шаги 2, 3 и 4. Если мало, то завершаем алгоритм.

IV. Результаты экспериментов

Подберем 7 цветов из предустановленных красок MICHIGAN BROWN EXTRACT (Black Catechu/Kattha), ESTEBIO INDIGO(Indigo), WINE RED EXTRACT 4001(Lac), ONION PEEL EXTRACT(Onion Skin) и SUN YELLOW EXTRACT (Marigold) из таблицы 1.[12].

$$x_1 = 50 \text{ у.е. и } x_2 = 40 \text{ у.е.}$$

Переменные задачи:

Обозначим y_1, y_2, y_3 , соответствующее количество краски для ковров

1. Ограничения, которым должны удовлетворять переменные задачи:

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

$$n = 50(32, 98, \dots) \text{ строка}$$

$$P = 7(m)(2, 3, 5, 7, \dots) \text{ нечеткие числа}$$

Далее решается задача оптимизации по остальным трем цветам для $P = \text{mod } 7$. Остальных цвета выбираются методом симплекса оптимизации из остальных цветов таблиц оставшихся по 17 цветам.

Тогда вычислим максимум и минимум.

$$S'_{\min} = 65,000.00 - 600 * 50 - 324 * 40 = 22,040.00,$$

$$S'_{\max} = 75,000.00 - 600 * 50 - 324 * 40 = 32,040.00$$

Задача №2. Выбираем в качестве заданных цветов Indigo Blue (ESTEBIO INDIGO) и Wine Red (WINE RED EXTRACT 4001, Lac) из таблицы цветов

Целевая функция задачи.

$$F = \sum_{i=1}^{P_1} x_i y_i \rightarrow \min.$$

Обозначим F – доход от продажи ковров, тогда целевая функция задачи записывается так:

$$F = 135x_1 + 132x_2 + 84x_3 \rightarrow \min.$$

Таким образом, задача состоит в том, чтобы найти $\min F = 135x_1 + 132x_2 + 84x_3 \rightarrow \min$, при ограничениях:

$$11 \leq x_1 \leq 140$$

$$11 \leq x_2 \leq 140$$

$$11 \leq x_3 \leq 140$$

$$135x_1 + 132x_2 + 84x_3 \leq 32,040$$

$$135x_1 + 132x_2 + 84x_3 \geq 22,040$$

Используя симплекс-метод для решения этой оптимизационной задачи, мы получаем следующие результаты:

$$x_1 = 85.00; \quad x_2 = 78; \quad x_3 = 11.00;$$

$$F(x_1, x_2, x_3) = 22,695.$$

Итак, стоимость красок, которые мы использовали для ковра, если она равна $x_1 = 85.00 \text{ у.е.}; x_2 = 78.00 \text{ у.е.}; x_3 = 11.00 \text{ у.е.}; x_4 = 50.00 \text{ у.е.}; x_5 = 40.00 \text{ у.е.}$ ковер $F = 65,655.00 \text{ у.е.}$ равна общим издержкам производства.

V. Обсуждение результатов

Мы представили результаты экспериментов, которые показали эффективность предложенных алгоритмов оптимизации цветовых параметров фрактальных изображений ковров. Генетический алгоритм и метод оптимизации симплекс позволяют получить оптимальные значения цветовых параметров для создания красивых и уникальных ковровых дизайнов. Кроме того, мы провели классификацию цветов фрактальных структур с помощью нейронной сети, которая показала высокую точность при определении цветовых характеристик фрактальных изображений. В заключение, наши результаты показывают, что разработанные алгоритмы могут быть использованы для создания красивых и уникальных ковровых дизайнов с использованием фракталов. Классификация цветовых характеристик фрактальных структур также может быть

использована для создания автоматических инструментов для создания ковровых дизайнов, что позволит сократить время и усилия, затрачиваемые на создание уникальных дизайнов.

VI. Выводы и заключение

Применяя метод теории биномиальных многочленов с арифметическими свойствами, разработан алгоритм метода визуализации изображений во фрактальной форме с учетом теории алгебраических структур и простых чисел на основе треугольника Паскаля. Эти метод и алгоритм позволили визуализировать фрактальные формы на основе треугольника Паскаля[5].

Настоящая время широкое использование сложных фрактальных форм в ковровой промышленности, создание ее математической модели, а также использование методов линейного программирования и методов оптимизации можно перейти на новый инновационный современный этап в ковровой промышленности, оценив себестоимость продукции и создав оптимизацию затрат. Поэтому при производстве ковровых изделий заданного размера целесообразно применять методы математического программирования для подбора оптимального набора красок, что можно сделать с наименьшими затратами и максимальной выгодой.

Список литературы

1. Nuraliev F. M., Nazrulloev O., Tastanova S. A. Genetik algoritm yordamida gilam dizaynida fraktal tuzilishli naqsh ranglarini optimallashtirish // МУҲАММАД АЛ-ХОРАЗМИЙ АВЛУДЛАРИ. 2022. № 3 (21).
2. Нуралиев Ф. М., Назруллоев О., Эгамбердиев Н., Тастанова С. А. Гилам махсулотларининг мураккаб фрактал тасвирларида рангларни оптималлаштириш // Кимёвий технология, назорат ва бошқрув. Ташкент. 2022. № 2. 104.
3. Nuraliev F., Tastanova S., Bulanova T. The use of methods for optimizing the genetic algorithm for the colors of a fractal structure pattern in carpet design // Farabi Journal of Social Sciences. 2022. Vol. 8, is. 2. Pp. 66–73.
4. Bondarenko B. A. Generalized Pascal Triangles and Pyramids, their Fractals, Graphs, and Applications – USA, Santa Clara: Fibonacci Associations, The Third Edition. 2010. 296 pp.
5. Anarova Sh.A., Nuraliev F. M., Narzulloev O. M. Construction of the equation of fractals structure based on the rvachev r-functions theories. J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1260. 072001. Pp. 1–9.
6. Nuraliev F. M., Anarova Sh. A, Narzulloev O. M. Mathematical and software of fractal structures from combinatorial numbers // 2019 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan. 2019. Pp. 1–4.

УДК 517.9.539.3

Математическое моделирование пространственного стержня при знакопеременном упруго-пластическом нагружении Mathematical modeling of a spatial rod under alternating elastic-plastic loading

М. Олимов, С. Мухаммадамин угли Абдужалилов
Наманганский инженерно-строительный институт, г. Наманган, Узбекистан

M. Olimov, S. Abdujalilov
Namangan Engineering-Construction Institute, Namangan, Uzbekistan

Аннотация. На основе теории малых упруго-пластических деформаций сформулированы краевые задачи пространственных стержней при знакопеременном упруго-пластическом нагружении. Рассмотрена сходимость метода в зависимости от количества узлов в сетке, интенсивности нагрузки, числа полупериодов нагружения и приведены законы распределения зоны пластичности в разных сечениях стержня.

Ключевые слова: Пространство, стержень, нагружение, знакопеременное нагружение, произвольное количество упруго-пластических нагружений, интенсивность деформации, функции пластичности.

Abstract. Boundary-value problems of three-dimensional rods under alternating elastic-plastic loading are formulated on the basis of the theory of small elastic-plastic deformations. The convergence of the method is considered depending on the number of nodes in the grid, the intensity of the load, and the number of loading half-cycles; the laws of distribution of the plastic zone in different sections of the rod are given.

Keywords: Space, rod, loading, alternating loading, arbitrary number of elastic-plastic loads, strain intensity, plasticity functions.

I. Введение

На основе теории малых упругопластических деформаций [1] и гипотезы, предложенной В. З. Власовым, Г. Ю. Джанелидзе и В. К. Кабуловым в данной работе исследуются напряженно-деформированные состояния стержней при пространственном нагружении с учетом пластических деформаций [2]. В работе [3] рассмотрены пространственные задачи при переменных нагружениях без учёта знакопеременных нагружений. В работе [4] преводится алгоритм расчёта циклических упруго-пластических нагружений пластин и оболочек на основе теории А. А. Ильюшина - В. В. Москвитина.

II. Постановка задачи

Выполняя необходимые операции в области первого, второго и произвольного количества упруго-пластических нагружений и разгрузений с номером k , получим систему дифференциальных уравнений при пространственно-переменном нагружении стержня прямоугольного поперечного сечения описанную следующим образом [1,2,4,5].

$$\begin{aligned}
 & \frac{d}{dx} \left[(A^{YII} - A^{IIII(k)}) \frac{d\vec{V}^{(k)}}{dx} + (B^{YII} - B^{IIII(k)}) \vec{V}^{(k)} \right] + (C^{YII} - C^{IIII(k)}) \frac{d\vec{V}^{(k)}}{dx} + \\
 & + (D^{YII} - D^{IIII(k)}) \vec{V}^{(k)} = \vec{F}^{(k)} + \frac{d}{dx} \left(A^{IIII(k)} \frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{dx} + B^{IIII(k)} \frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{dx} \right) + \\
 & + C^{IIII(k)} \frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{dx} + D^{IIII(k)} \vec{V}^{0(k-1)} + \sum_{m=1}^{k-1} \left\{ \frac{d}{dx} \left[A^{IIIO(k-m)} \frac{d}{dx} (\vec{V}^{0(k-m)} - \vec{V}^{0(k-m-1)}) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + B^{IIIO(k-m)} (\vec{V}^{0(k-m)} - \vec{V}^{0(k-m-1)}) \right] + C^{IIIO(k-m)} \frac{d}{dx} (\vec{V}^{0(k-m)} - \vec{V}^{0(k-m-1)}) + \right. \\
 & \left. + D^{IIIO(k-m)} (\vec{V}^{0(k-m)} - \vec{V}^{0(k-m-1)}) \right\}. \\
 & \left\{ - (A^{YII} - A^{IIII(k)}) \frac{d\vec{V}^{(k)}}{dx} - (B^{YII} - B^{IIII(k)}) \vec{V}^{(k)} - \vec{Q}^{(k)} - B^{IIIO(k)} \vec{V}^{(k-1)} - \right. \\
 & - A^{IIIO(k)} \frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{dx} - \sum_{m=1}^{k-1} \left[A^{IIIO(k-m)} \frac{d}{dx} \vec{V}^{0(k-m)} - \vec{V}^{0(k-m-1)} + \right. \\
 & \left. \left. + B^{IIIO(k-m)} (\vec{V}^{0(k-m)} - \vec{V}^{0(k-m-1)}) \right] \right\} \delta \vec{V}^{(k)} \Big|_r = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\vec{V}^{(k)}$ - вектор функции 9-го порядка; $\vec{F}^{(k)}$, $\vec{Q}^{(k)}$ - векторы 9-го порядка A^{YII} , $A^{IIII(k)}$, B^{YII} , $B^{IIII(k)}$, C^{YII} , $C^{IIII(k)}$, D^{YII} , $D^{IIII(k)}$ квадратные матрицы 9-го порядка [3,6].

$$\vec{V}^{(k)} = \{ W^{(k)}, \alpha_1^{(k)}, \beta_1^{(k)}, V^{(k)}, \alpha_2^{(k)}, \beta_2^{(k)}, U^{(k)}, \theta^{(k)}, \nu^{(k)} \}.$$

Исследование проводится на основе системы дифференциальных уравнений (1) и граничных условий (2). Алгоритм для поставленной задачи приводится в работе [3].

В качестве примера предлагается упруго-пластический стержень, защемленный с обоих концов при пространственно-переменном нагружении.

Рассмотрена сходимость метода в зависимости от количества узлов в сетке, интенсивности нагрузки и числа полциклов нагружения.

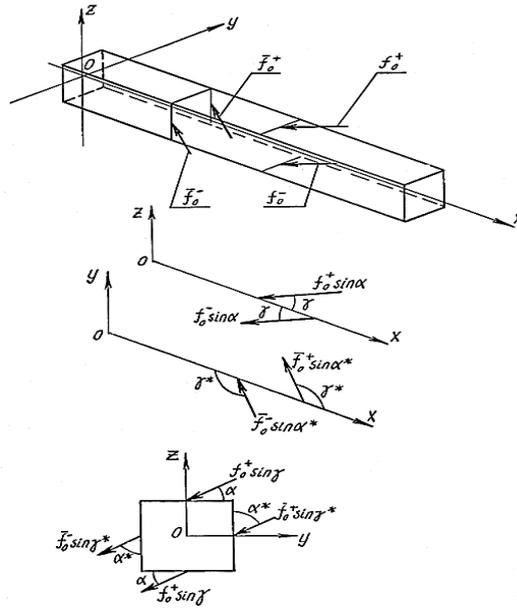


Рис. 1. Закон распределения внешней нагрузки

Направления f_0^+ и f_0^- плоскости, параллельной XOY , составляют угол γ , а проекции f_0^+ и f_0^- на плоскость, параллельную XOY с осью OY , составляют угол α . Направления \bar{f}_0^+ и \bar{f}_0^- в плоскости, параллельной XOZ , составляют угол γ^* , а проекции \bar{f}_0^+ и \bar{f}_0^- на плоскость, параллельную XOZ с осью OZ , составляют угол α^* . При этом компоненты вектора внешних сил получают следующий вид (см. рис. 1):

$$f_1^{+(k)} = (-1)^{k-1} f_0^+ \sin \alpha \cdot \cos \gamma,$$

$$f_1^{-(k)} = (-1)^{k-1} f_0^- \sin \alpha \cdot \cos \gamma,$$

$$\bar{f}_1^{+(k)} = (-1)^{k-1} \bar{f}_0^+ \sin \alpha^* \cdot \cos \gamma^*,$$

$$\bar{f}_1^{-(k)} = (-1)^{k-1} \bar{f}_0^- \sin \alpha^* \cdot \cos \gamma^*,$$

$$f_2^{+(k)} = (-1)^{k-1} f_0^+ \sin \gamma \cdot \cos \alpha,$$

$$f_2^{-(k)} = (-1)^{k-1} f_0^- \sin \gamma \cdot \cos \alpha,$$

$$\bar{f}_2^{+(k)} = (-1)^{k-1} \bar{f}_0^+ \sin \gamma^* \cdot \cos \alpha^*,$$

$$\bar{f}_2^{-(k)} = (-1)^{k-1} \bar{f}_0^- \sin \gamma^* \cdot \cos \alpha^*,$$

$$f_3^{+(k)} = (-1)^{k-1} f_0^+ \sin \alpha \cdot \cos \gamma,$$

$$f_3^{-(k)} = (-1)^{k-1} f_0^- \sin \alpha \cdot \cos \gamma,$$

$$\bar{f}_3^{+(k)} = (-1)^{k-1} \bar{f}_0^+ \sin \gamma \cdot \cos \alpha,$$

$$\bar{f}_3^{-(k)} = (-1)^{k-1} \bar{f}_0^- \sin \gamma \cdot \cos \alpha,$$

Компоненты вектора \vec{F} в дифференциальном уравнении (1) формируются так:

$$F_1^{(k)} = \frac{\ell^4}{3Gh_0J_0} \left[b_0 (f_3^{+(k)} + f_3^{-(k)}) + h_0 (f_3^{+(k)} + f_3^{-(k)}) \right],$$

$$F_2^{(k)} = \frac{\ell^3}{3Gh_0J_0} \left[\frac{b_0 h_0}{2} (f_1^{+(k)} - f_1^{-(k)}) \right],$$

$$F_4^{(k)} = \frac{\ell^4}{3Gh_0J_0} \left[h_0 (\bar{f}_2^{+(k)} + \bar{f}_2^{-(k)}) + b_0 (f_2^{+(k)} + f_2^{-(k)}) \right],$$

$$F_5^{(k)} = \frac{\ell^3}{3Gh_0J_0} \left[\frac{b_0 h_0}{2} (\bar{f}_1^{+(k)} - \bar{f}_1^{-(k)}) \right],$$

$$F_7^{(k)} = \frac{\ell^3}{3Gh_0J_0} \left[h_0 (f_1^{+(k)} + f_1^{-(k)}) + b_0 (\bar{f}_1^{+(k)} - \bar{f}_1^{-(k)}) \right],$$

$$F_8^{(k)} = \frac{\ell^4}{3Gh_0J_0} \left[\frac{b_0 h_0}{2} (f_2^{+(k)} - f_2^{-(k)}) - \frac{b_0 h_0}{2} (\bar{f}_3^{+(k)} - \bar{f}_3^{-(k)}) \right],$$

III. Результаты экспериментов

На рис.2, а, б, в, г, д приведены законы распределения зоны пластичности в разных сечениях стержня, а на рис. 3 - законы изменения функции пластичности ω по сечениям стержня $x = 0$ и $x = 0,2$. Из рис. 2, б видно, что торцевая часть стержня полностью переходит в пластическую зону. В этом сечении закон изменения ω приведен в виде графика на рис.3, а. На рис. 2, в-д приведены законы изменения пластической зоны с удалением от торца в поперечном сечении стержня.

В табл. 1 показан характер сходимости итерационного процесса при циклическом нагружении в зависимости от количества узлов сетки N . Анализируя значения интенсивности деформации $\ell_1 = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_s}$ и функции пластичности ω для дальнейшего ведения серийного счета таких типов задач можно принять $N = 60$.

ТАБЛИЦА 1
ЗАВИСИМОСТЬ ЧИСЕЛ ИТЕРАЦИИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ШАГОВ СЕТКИ

k	$\bar{\gamma}(N = 20)$	$\bar{\gamma}(N = 40)$	$\bar{\gamma}(N = 60)$	$\bar{\gamma}(N = 80)$
1	5	6	5	6
2	4	5	5	5
3	5	5	6	5
4	3	4	5	4
5	4	5	5	6

Из анализа таблицы видно, что при всех значениях k и N количество итераций лежит в интервале $4 \leq \bar{\gamma} \leq 6$.

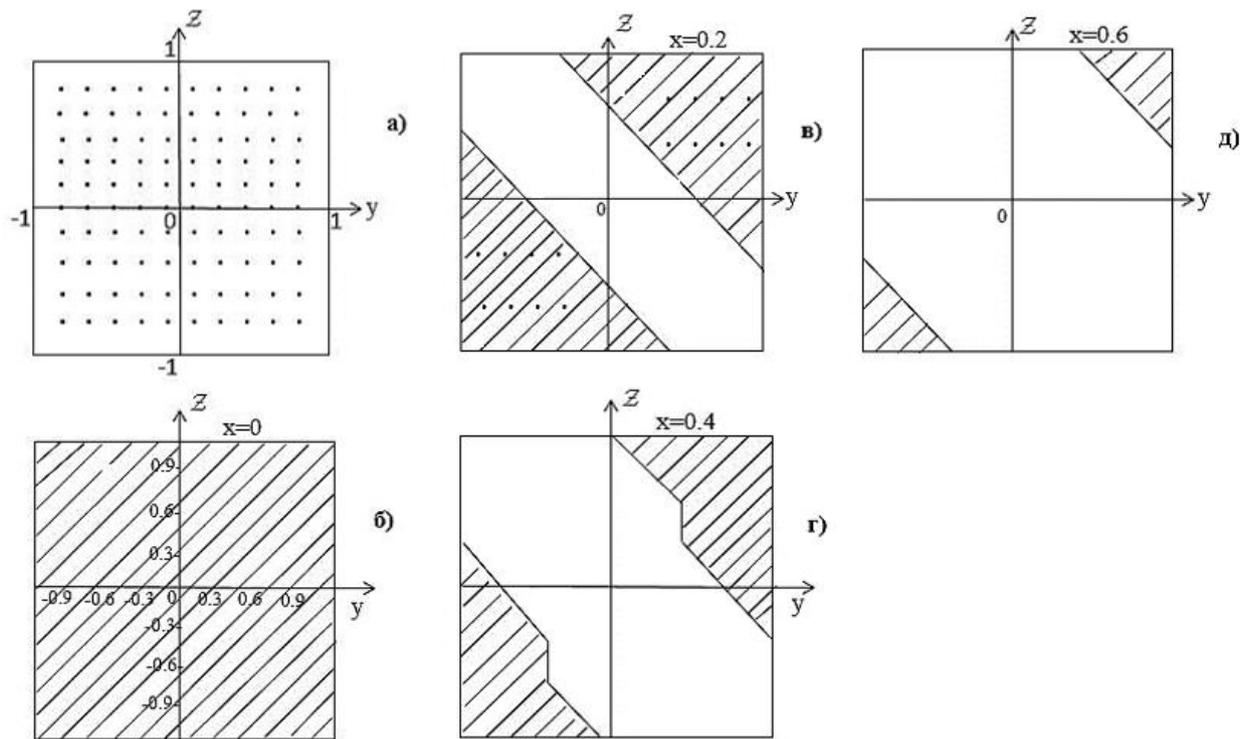


Рис. 2. (а, б, в, г, д) Зоны пластичности

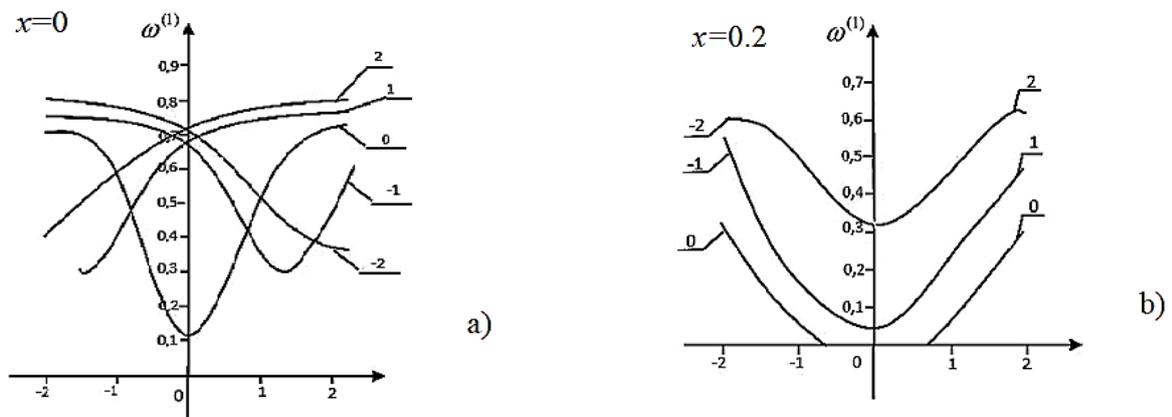


Рис. 3. (а, б). Кинетика изменения функции пластичности

ТАБЛИЦА 2
ИЗМЕНЕНИЕ ПО ПОПЕРЕЧНОМУ СЕЧЕНИЮ

№	-2	-1	0	1	2
Z	-0.978160	-0.613371	0	0.613371	0.978160

Что с увеличением количества циклов, начиная с $k = 2 \dots 5$ значения интенсивности деформации и функции пластичности убывают (см.табл.3). Максимальное значение компонентов перемещений, интенсивности деформации и функции пластичности пространственного стержня, защемленного обоими концами, получены по обобщенному принципу Мазинга. Это означает, что материал идет к упрочнению, т.е. имеет циклически упрочняющийся характер.

ТАБЛИЦА 3
ИНТЕНСИВНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ И ФУНКЦИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ

$\ell_1^{(k)}(0.0)$							
1	7,31370142	7,68634740	13	7,75889689	2,6	7,78489531	0,9
2	7,51827365	7,74812557	13,1	7,79020536	2,6	7,8053152	1.0
3	6,40469856	6,62671178	13,6	6,6663964	2,4	6,6797069	0,8
4	6,40399206	6,6252039	12,5	6,66240531	2,3	6,6741987	0,8
5	6,40369528	6,624752	13,6	6,65980926	2,1	6,6672410	0,4
$\omega^{(k)}(0.0)$							
1	0,83940250	0,89035996	8,6	0,80565947	0,9	0,80887407	0,5
2	0,82428934	0,80656078	16	0,82943462	0,7	0,82377611	0,4
3	0,87369831	0,86599980	25	0,87990414	3,1	0,88442516	0,8
4	0,87335799	0,86545798	24,8	0,8785388	3,2	0,88256437	0,7
5	0,87321493	0,86529540	25	0,87764508	3,2	0,87607140	0,4

IV. Заключение

В заключении отметим, Проведен упруго-пластический расчет при различных пространственных нагрузениях с учетом обобщенного принципа Мазинга-Москвитина. Изучена кинетика напряженно-деформированного состояния стержня от цикла к циклу для циклически анизотропных материалов. Это позволяет более эффективно произвести расчет на прочность и деформируемость элементов конструкций.

Список литературы

1. Кабулов В. К. Алгоритимизация в теории упругости и пластичности. Ташкент: Фан, 1966. 394 с.
2. Москвитин В. В. Циклические нагружения элементов конструкций. М.: Наука, 1981. 344 с.
3. Олимов М., Каримов П., Исмоилов Ш. М. К решению краевых задач пространственных стержней при переменных упруго-пластических нагружениях // Молодой ученый. 2015. № 13. С. 162–167.
4. Буриев Т. Расчет тонких плит на ЭВМ. Ташкент: Фан», 1976. 131 с.
5. Олимов М., Исмоилов Ш. М., Комилов С. Р. Модульный анализ сеточных методов решения дифференциальных уравнений // Молодой ученый. 2016. № 10. С. 288–291.
6. Olimov M., Ismanova K., Karimov P., Ismoilov S. Amaliy matematik dasturlar paketi. Toshkent, 2015. 191с.

Математическая модель процесс переноса и диффузия загрязняющих вредных веществ в атмосфере с учетом захвата аэрозольных частиц элементами растительности
Mathematical model of the transfer process and diffusion of harmful pollutants substances in the atmosphere, taking into account the capture of aerosol particles by vegetation elements

Н. Равшанов¹, Т. Р. Шафиев², Ш. Э. Назаров², Б. Боборахимов¹

¹Институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта, г. Ташкент, Узбекистан

²Бухарский государственный университет, г. Бухара, Ташкент

N. Ravshanov¹, T. R. Shafiyev², Sh. E. Nazarov², B. Boborakhimov¹

¹Digital technologies and artificial intelligence research institute, Tashkent, Uzbekistan

²Bukhara State University, Bukhara, Tashkent

Аннотация. Для мониторинга и прогнозирования концентрация вредных веществ, выброшенных из объектов производства и транспортных систем предложена математическая модель с помощью, которая можно оценить захвата аэрозольных частиц в атмосфере элементами растительности, которая позволяет более точно прогнозировать степени загрязнения окружающая среда и разрабатывать меры по их снижению. Вычислительные эксперименты были проведены с реальными погодно-климатическими факторами полученные из онлайн сервисов. Определены основные параметры, которые играют существенную роль в процессе переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере. Для проверки адекватности разработанного математического аппарата сопоставлены результаты проведенных численных расчетов с результатами других авторов.

Ключевые слова: Математическая модель, растительности, вычислительный эксперимент, переноса и диффузия загрязняющих веществ, плотности листовой поверхности.

Abstract. The purpose of this work is to develop a mathematical model that will allow us to evaluate the influence of vegetation on the processes of transfer and diffusion of aerosol particles in the atmosphere. This will make it possible to more accurately predict the spread of pollution in the environment and develop measures to reduce them. Computational experiments were carried out with real weather and climate factors obtained from online services. The main parameters that play a significant role in the process of transfer and diffusion of harmful substances in the atmosphere are determined. To check the adequacy of the developed mathematical apparatus, computational experiments were carried out on a computer.

Key words: Mathematical model, vegetation, computational experiment, transport and diffusion of pollutants, weather and climate factors.

I. Введение

Моделирование процессов переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере является сложной задачей, которая требует учета различных факторов, таких как изменения скорости ветра, температуры, влажности, наличия элементов растительности и других. В частности, учет захвата частиц элементами растительности является важным аспектом моделирования процессов переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере. Растения могут захватывать аэрозольные частицы из воздуха на своих листьях, стеблях и корнях. Эффективность этого процесса зависит от вида и густоты растительности [1].

Включение учета захвата частиц элементами растительности при моделирование процессов переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере позволяет более точно описать транспорт этих частиц в атмосфере. Это может быть полезно для определения уровней загрязнения воздуха, а также для оценки влияния аэрозолей на здоровье человека и экосистемы. Кроме того, моделирование учетом захвата частиц элементами растительности может быть полезно для исследования вопросов, связанных с углеродным циклом в природных экосистемах, таких как леса и почвы.

Существует много исследований, посвященных моделированию процесса переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере в которых рассматривается учет захвата частиц элементами растительности. Одной из таких работ является статья [2], где были проведены моделирование атмосферного потока и переноса частиц в городских улицах с учетом наличия насаждений. Результаты моделирования показали, что растительность может значительно сокращать концентрацию частиц в воздухе за счет захвата частиц на элементах растительности.

В статье [3] представляется исследование, направленное на изучение влияния деревьев, на рассеивание загрязнителей воздуха в городских районах. Авторы использовали моделирование вычислительной гидродинамики (CFD) для изучения аэродинамического воздействия деревьев на рассеивание загрязнителей воздуха. Исследование было сосредоточено на двух аспектах аэродинамического воздействия деревьев на рассеивание загрязнителей воздуха: 1) влияние характеристик деревьев, таких как высота и плотность, на характер воздушного потока и 2) влияние деревьев на рассеивание воздуха, загрязняющие вещества. Модель CFD, использованная в исследовании, была проверена с помощью экспериментов в аэродинамической трубе и полевых измерений.

Авторами статьи [4] исследуется потенциал придорожных хвойная растительность для смягчения загрязнения воздуха. В исследовании измерялось качество воздуха в четырех местах в Цинциннати, штат Огайо, в течение одного года, сравнивая качество воздуха в местах с придорожными хвойными деревьями и без них. Результаты показали, что придорожные хвойные деревья оказали значительное влияние на снижение загрязнения воздуха, особенно твердых частиц (ТЧ) и диоксида азота (NO₂). Было обнаружено, что хвойные деревья снижают концентрацию ТЧ до 60% и концентрацию NO₂ до 30%. Авторы связывают эффект смягчения загрязнения воздуха придорожными хвойными деревьями их способностью поглощать загрязняющие вещества через листья и улавливать частицы на хвое. Авторы отмечают, что это исследование подчеркивает важность зеленой инфраструктуры, такой как придорожная растительность, для снижения загрязнения воздуха и улучшения здоровья населения.

В статье [5] авторы рассматривают поведение концентрации и потоков скалярных величин (таких как тепло, влага и загрязнения) в области, находящейся за лесными патами. Авторы использовали моделирование на основе крупномасштабной симуляции турбулентности (LES) для исследования этого явления. Они сравнили результаты моделирования с экспериментальными данными, полученными на базе данных Германии. В статье показано, что в лесной зоне, ветер неоднороден, и существует область, где концентрация и потоки скалярных величин увеличиваются по сравнению с их значениями в открытом пространстве. Этот эффект связан с тем, что лес уменьшает вертикальную турбулентность и создает более устойчивые условия, что приводит к увеличению концентрации и потоков скалярных величин в области, находящейся за лесными путчами. Статья имеет важное значение для понимания роли лесов в глобальном цикле веществ и энергии, а также может быть полезна для разработки стратегий управления лесными экосистемами для уменьшения воздействия загрязнения на окружающую среду. Однако, стоит учитывать, что данные в статье основаны на моделировании, и для подтверждения результатов требуются дополнительные исследования на месте.

Таким образом, учет захвата частиц элементами растительности является важным аспектом моделирования процессов переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере, который может дать более точное представление об этих процессах и их воздействии на окружающую среду.

Исходя из этих соображений, в данной работе рассматривается моделирование процесса переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере с учетом захвата частиц элементами растительности. Это позволяет учесть влияние растительности на процессы переноса и диффузии аэрозольных частиц, так как растения могут захватывать частицы из воздуха.

II. Постановка задачи

Рассмотрим математическую модель распространения аэрозольных частиц в атмосфере, описываемую полным уравнением гидромеханики с учетом захвата частиц загрязняющих веществ элементами растительности:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \sigma \theta + \alpha \theta = \mu \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \delta Q \quad (1)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\theta|_{t=0} = \theta^0; \quad (2)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi (\theta_E - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi (\theta_E - \theta); \quad (3)$$

$$-\mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi (\theta_E - \theta); \quad \mu \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi (\theta_E - \theta); \quad (4)$$

$$-\kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta \theta - f_0); \quad \kappa \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = \xi (\theta_E - \theta). \quad (5)$$

Здесь, θ — концентрация вредных веществ в атмосфере; t — время; θ^0 — первичная концентрация вредных веществ в атмосфере; θ_E — концентрация, поступающая через границы рассматриваемой области; x, y, z — система координат; u, v, w — скорость ветра по трём направлениям; w_g — скорость осаждения частиц; σ — коэффициент поглощения вредных веществ в атмосфере; $\alpha(z)$ — коэффициент, характеризующий захват частиц

элементами растительности; μ , κ – коэффициенты диффузии и турбулентности; Q – мощность источника; δ – функция Дирака; ξ – коэффициент массообмена через границы области расчета; β – коэффициент взаимодействия частиц с подстилающей поверхностью; f_0 – стационарный источник выброса вредных веществ с подстилающей поверхности земли.

Поскольку моделирование элементов растительности, таких как ветви и листья, требует больших вычислительных затрат, влияние растительности на воздушный поток усредняется по пространству и учитывается путем добавления соответствующих членов поглощения и источника к управляющим уравнениям [6].

$$\alpha(z) = -\rho C_d L(z) U u_i \quad (6)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; C_d – коэффициент лобового сопротивления; $L(z)$ – профиль плотности листовой поверхности растительности (или показатель площади поверхности листьев на единицу объема); U – скорость воздушного потока; u_i – скорость в интересующем направлении.

Плотности листовой поверхности (*LAD- с англ. leaf area density*) – это параметр, который используется для описания структуры растительных сообществ и характеризует количество листьев, находящихся на определенной площади или объеме растительной массы. LAD определяется как общая площадь листовой поверхности, приходящаяся на единицу объема или площади растительной массы. Обычно выражается в единицах площади листовой поверхности на единицу объема или площади, например, квадратных метров на кубический метр (м²/м³) или квадратных метров на квадратный метр (м²/м²) [4,7].

$$LAD(z) = L_m \left(\frac{h - z_m}{h - z} \right) \exp \left[n \left(1 - \frac{h - z_m}{h - z} \right) \right] \quad (7)$$

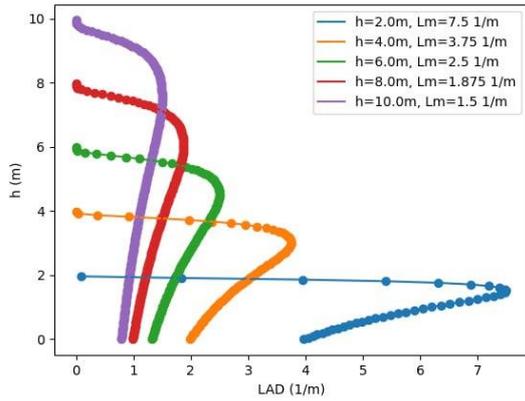
где

$$n = \begin{cases} 6 & 0 \leq z \leq z_m, \\ 0,5 & z_m \leq z \leq h. \end{cases}$$

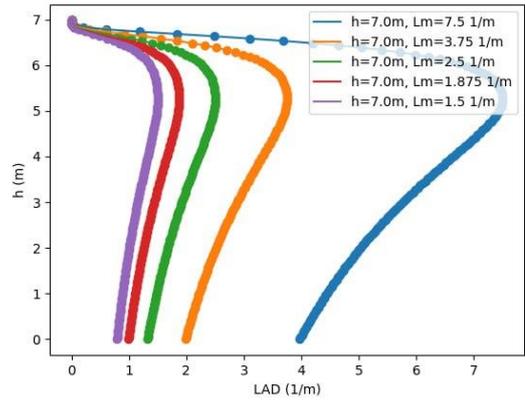
L_m – максимальная LAD в пределах растительности; z – высота, z_m – высота, на которой происходит L_m ($z_m = 0,4 h$); h – высота растительности.

III. Результаты экспериментов

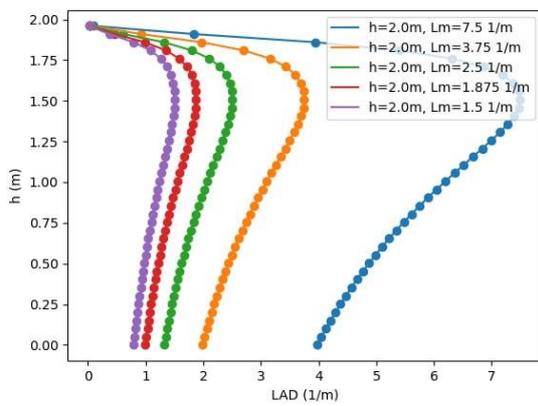
Вычислительным экспериментом установлено, что как растет высоту растительность, а ее LAD уменьшается рис-1. а). В рисунки б), с), д), е) видно, если высота растительность одинаковые тогда LAD тоже уменьшается, но двух случае зависит параметр L_m . В пределах одного растения: как правило, плотность листовой поверхности имеет тенденцию к уменьшению по мере увеличения высоты растения. Это связано с тем, что по мере того, как растение становится выше, оно должно выделять больше ресурсов для поддержки своего стебля и ветвей, оставляя меньше ресурсов для производства листьев. Однако точное соотношение между LAD и высотой может варьироваться в зависимости от вида растения и среды, в которой оно растет. Между разными растениями: в лесу или другой природной экосистеме взаимосвязь между LAD и высотой может быть более сложной. Например, в лесу с закрытым пологом более высокие деревья могут иметь меньшую плотность листовой поверхности из-за конкуренции за свет, в то время как более низкие деревья могут иметь более высокую LAD из-за их способности расти в затененных условиях. Точно так же на открытых пастбищах или в пустынях у более высоких трав может быть более высокая LAD из-за их необходимости фотосинтеза под прямыми солнечными лучами, в то время как у более низких трав может быть более низкая LAD.



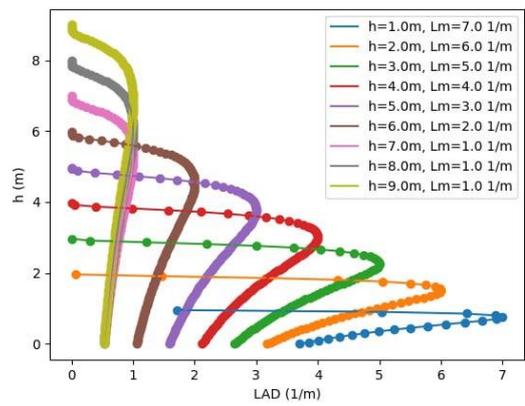
а)



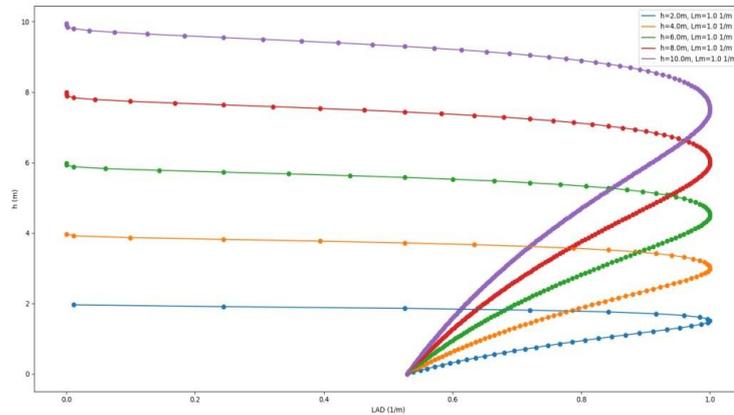
б)



в)



д)



е)

Рис. 1. а), б), в), д), е) профиль LAD для всех случаев густой растительности, оцененных в этом исследовании, где L_m — максимальная LAD, которая возникает на высоте $z = 0,4h$. Как растительность растет в высоту, ее LAD уменьшается.

IV. Выводы и заключение

Таким образом, учет захвата частиц элементами растительности является важным аспектом моделирования процессов переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере, который может дать более точное представление об этих процессах и их воздействии на окружающую среду. Вычислительным экспериментом установлено, что как растительность растет в высоту, ее LAD уменьшается (рис. а), б), в), д), е).

Результаты исследования показывают, что снижение LAD приводит к меньшему осаждению частиц, что приводит к изменению размера частиц. Зрелость растительного барьера влияет на критический размер частиц, при котором преобладают эффекты отложения или рассеивания растительности; таким образом, это очень важный параметр, учитывающий сокращение выбросов загрязняющих веществ. Практический выход проведенного исследования заключается в возможности выработки рекомендаций для поддержки принятия решений по сохранению экологического баланса окружающей среды в промышленных регионах, а также ее защите от возможного негативного воздействия техногенных факторов.

Несмотря на то, что исследования по моделированию процесса переноса и диффузии аэрозольных частиц с учетом захвата частиц элементами растительности продолжаются, они уже доказывают потенциал использования растительных покровов для улучшения качества воздуха в городах.

Список литературы

1. Ozdemir H. Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution // Sci. Total Environ. 2019. Vol. 659. Pp. 1176–1185.
2. Zheng T. [et al.]. Impacts of vegetation on particle concentrations in roadside environments // Environ. Pollut. 2021. Vol. 282. P. 117067.
3. Amorim J. H. [et al.]. CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion // Sci. Total Environ. 2013. Vol. 461–462. Pp. 541–551.
4. Hashad K. [et al.]. Impact of roadside conifers vegetation growth on air pollution mitigation // Landsc. Urban Plan. 2023. Vol. 229. P. 104594.
5. Kanani-Sühring F., Raasch S. Enhanced Scalar Concentrations and Fluxes in the Lee of Forest Patches: A Large-Eddy Simulation Study // Boundary-Layer Meteorol. 2017. Vol. 164, no. 1. Pp. 1–17.
6. Shaw R.H. Large-eddy simulation and within. 1992. Pp. 47–64.
7. Mihailovic D. Lalic, B. and Mihailovic, D.T., 2004: An empirical relation describing leaf area density inside the forest for environmental modelling. Journal of Applied Meteorology, 43(4), 641-645 // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2004.

УДК 534.1

Собственные и вынужденные колебания трубопроводов, контактирующих со средой Винклера **Natural and forced oscillations of pipelines in contact with the Winkler medium**

И. И. Сафаров¹, М. Х. Тешаев^{2,3,4}, З. И. Болтаев^{2,3}, И. М. Каримов¹, Н. К. Эсанов⁵

¹Ташкентский химико-технологический институт, г. Ташкент, Узбекистан

²Бухарское отделение института Математики им. В.И. Романовского, г. Бухара, Узбекистан

³Бухарский инженерно-технологический институт, г. Бухара, Узбекистан

⁴Международный университет «Азия», г. Бухара, Узбекистан

⁵Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан

I. I. Safarov¹, M. Kh. Teshayev^{2,3,4}, Z. I. Boltayev^{2,3}, I. M. Karimov¹, N. Q. Esanov⁵

¹Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan

²Bukhara branch of the Institute of Mathematics named after V.I. Romanovsky, Bukhara, Uzbekistan

³Bukhara Institute of Engineering and Technology, Bukhara, Uzbekistan

⁴Asia International University, Bukhara, Uzbekistan

⁵Bukhara State University, Bukhara, Uzbekistan

Аннотация. В работе рассматриваются линейные колебания криволинейного вязкоупругого стержня, лежащего на основании Винклера. Трубопровод моделируется как криволинейный стержень, контактирующий со средой Винклера. На основе принципа Даламбера получено уравнение движения стержня с учётом вязкоупругих свойств материала трубопровода. Составлены уравнения движения криволинейного стержня соответствующие заданным граничным и начальным условиям. Сформулированы соотношения, позволяющие представить решение краевой задачи для стержня в аналитической форме.

Ключевые слова: основание Винклера, вязкоупругий стержень, искривленная ось, принцип Даламбера, интегро-дифференциальные уравнения, коэффициент Пуассона.

Abstract. In this paper linear oscillations of a curved viscoelastic rod lying on the Winkler base are considered. The pipeline is modeled as a curved rod in contact with the Winkler medium. Based on the D'Alembert principle, the equation of rod motion is obtained, taking into account the viscoelastic properties of the pipeline material. The equations of motion of a curved rod corresponding to the given boundary and initial conditions are compiled. The relations allowing to present the solution of the boundary value problem for the rod in an analytical form are formulated.

Keywords: Winkler base, viscoelastic rod, curved axis, D'Alembert principle, integro-differential equations, Poisson's ratio.

1. Introduction

In recent times, aeromechanics has become one of the developing applied areas in the field of mechanics, within which great attention is paid to the study of the strength of elements under vibration, shock and other types of external influences [1,2]. Biomechanical structures, in general, have a very complex structure and shape [3,4]. Their mechanical properties depend on the individual characteristics of the organism, age, functional state, external factors and are largely determined by the stress-strain state, since the biomechanical system adapts to external influences. An organism, as an object of mechanics, is a complex system in which a hierarchical organization is viewed [5]. Considering the general methods of studying complex systems, it can be argued that their mathematical modeling requires the compilation of models of elements of the lowest level of the hierarchy, that is, in relation to this case, bones, muscles and internal organs. From the given examples of structuring it follows that the elements of the skeleton, i.e. bones, which are the main supporting elements of the structure of the organism, are an indispensable element of modeling [6]. In the vast majority of cases, bones can be represented as spatially curved rods of variable cross-section. In addition, the elements of the skeleton have pronounced viscoelastic properties [7, 8], varying both along the axis and in cross-section.

The method of modal analysis (modal decomposition) is currently used to solve problems on the dynamic behavior of viscoelastic bodies [9, 10]. Its advantage is the possibility of using both analytical and discrete models, in which there is a weak dependence on the nature of external influence. To implement the method, the decomposition of the motion of a viscoelastic body according to the modes of vibrations - the functional basis - according to the forms of free vibrations of an elastic body is used. The convenience of this basis is that it is a complete orthogonal system of functions, which simplifies the decomposition technique [11, 12].

Therefore, in this paper we consider the question of representing solutions to dynamic problems through combinations of elementary transcendental functions, which in the limit give strict solutions to a system of equations for forms of free oscillations. The complex eigen frequencies are determined by the Muller-Gauss method. Also, when the curvilinear pipeline lying on the base of the Winkler oscillates, the present work is considered.

II. Methods

II.1 Problem statement and solution methods

To derive the differential equations of motion of a curved rod, we select the elementary part of the curved rod (Fig.1). Consider the element of a curved rod of length ds and all the acting internal and external forces, which is shown in Fig. 1. In Fig.1, the following designations are adopted: $\vec{Q} = Q_1\vec{t} + Q_2\vec{n} + Q_3\vec{b}$ where $Q_1 = N$ axial force $Q_2 = Q_n$ -cutting force or normal force, $Q_3 = Q_b$ - shearing force or components of the shearing force vector by binormals; $\vec{M} = M_t\vec{t} + M_n\vec{n} + M_b\vec{b}$ -vector of internal moments, where M_t torque moment, M_n and M_b - bending moments; $\vec{q} = q_t\vec{t} + q_n\vec{n} + q_b\vec{b}$ -vector of external loads, q_t, q_n, q_b - components of the vector of external loads.

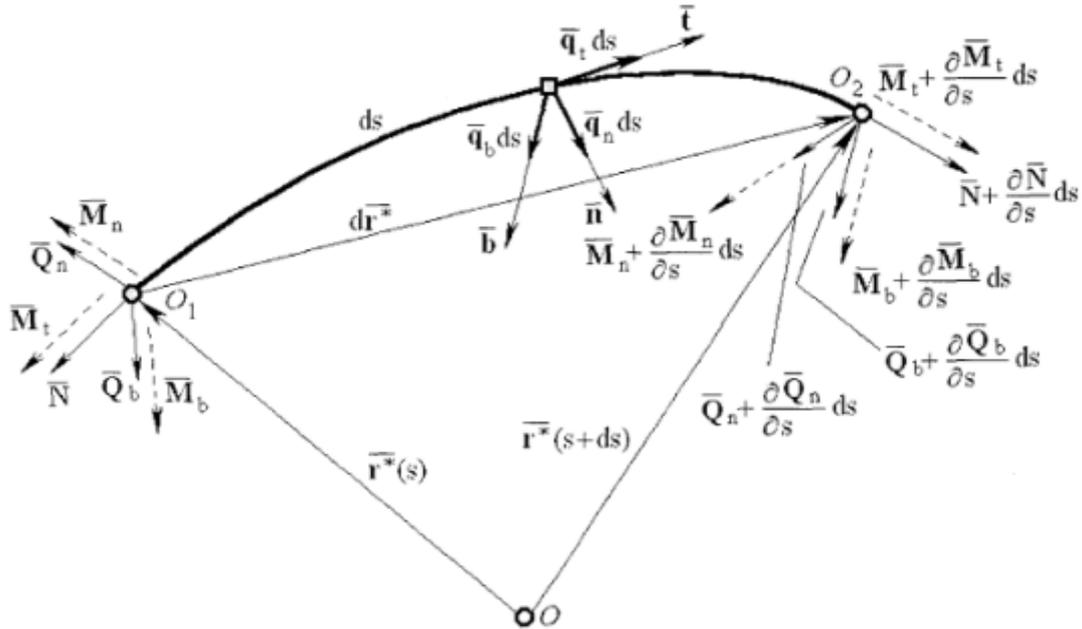


Fig. 1. The element of the rod of infinitely small length

The selected element is in equilibrium only when the sum of all forces and the sum of moments are equal to zero, which gives two vector equations:

$$\begin{aligned} d\bar{Q} + \bar{q}ds - \rho \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2} ds &= 0, \\ d\bar{M} + ds \bar{t} \times \bar{Q} + \bar{M}_I ds &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Here- \bar{M}_I is the main moment of inertia forces. The system of equations (1) can be written in the following form

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{N}}{\partial s} + \frac{\partial \bar{Q}_n}{\partial s} + \frac{\partial \bar{Q}_b}{\partial s} - \rho F \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2} + \bar{q} &= 0, \\ d\bar{M} + d\bar{M}_Q + d\bar{M}_a - d\bar{M}_I &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Here- $d\bar{M} = \frac{\partial \bar{M}_t}{\partial s} ds + \frac{\partial \bar{M}_n}{\partial s} ds + \frac{\partial \bar{M}_b}{\partial s} ds$ is the main moment arising in the sections of a curved rod;

$d\bar{M}_p$ -- the main factor of the forces of external loads. Taking into account the Frensay–Serre formula [13], it is possible to write through projections of tangent vectors \bar{t} , normal \bar{n} and binormals \bar{b} in the form of a system of three differential equations:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial s} - kQ_n - \rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + q_t &= 0, \\ \frac{\partial Q_n}{\partial s} + kN - Q_b \tau - \rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + q_n &= 0, \\ \frac{\partial Q_b}{\partial s} + Q_n \tau - \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + q_b &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Now we write the second equation (3) in expanded form. To do this, we use the expression of moments through displacements

$$d\bar{M}_I = (J_t \frac{\partial^2 u_t}{\partial t^2} \bar{t} + J_n \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} \bar{n} + J_b \frac{\partial^2 u_b}{\partial t^2} \bar{b}) \rho ds, \quad (4)$$

where J_t, J_n, J_b are moments of inertia of the rod relative to the axes.

To calculate the moments from the forces, we use the well-known ratio from vector analysis

$$d\bar{M}_Q = d\bar{r} \times \bar{Q} = \begin{vmatrix} \bar{t} & \bar{n} & \bar{b} \\ N & Q_n & Q_b \\ u & v & w \end{vmatrix}. \quad (5)$$

If we use the Fresne trihedron [13], then we will have

$$dM_o = \left(\bar{t} + \frac{\partial u}{\partial s} \bar{t} + \frac{\partial v}{\partial s} \bar{n} + \frac{\partial w}{\partial s} \bar{b} \right) \times (Q_t \bar{t} + Q_n \bar{n} + Q_b \bar{b}) \quad (6)$$

Vector multiplication (6) can be written through the components of vectors in scalar form. Now using equations (5) and (6) we obtain three more differential equations in scalar form

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial s} - kQ_n - \rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + q_t &= 0, \\ \frac{\partial Q_n}{\partial s} + kN - Q_b \tau - \rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + q_n &= 0, \\ \frac{\partial Q_b}{\partial s} + Q_n \tau - \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + q_b &= 0, \\ \frac{\partial M_t}{\partial s} + M_n k - J_t \rho \frac{\partial^2 u_t}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial M_n}{\partial s} + M_t k - M_b \tau - Q_b l - J_n \rho \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial M_b}{\partial s} + M_n \tau - Q_n l_1 - J_b \rho \frac{\partial^2 u_b}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

Thus, we obtained six differential equations with 12 unknowns

$$(N, Q_n, Q_b, M_t, M_n, M_b, u, v, w, u_t, u_n, u_b).$$

To obtain a closed system of equations, additional geometric and physical equations are needed. Normal stresses at any point of the rod, taking into account the viscoelastic properties of the rod material, are represented by Hooke's law [14-16]

$$\sigma_s = E_{0n} \left[\varepsilon_s(t, s) - \int_0^t R_{0E}(t - \tau) \varepsilon_s(\tau, s) d\tau \right] \quad (8)$$

where E_{0n} is instantaneous values of the modulus of elasticity, $R_{0E}(t - \tau)$ - the relaxation core of the material, σ_s - the tension of the rod along the axial line. Deformations along the axis

$$\varepsilon_s = \varepsilon - \frac{\partial u_b}{\partial s} y - \frac{\partial u_n}{\partial s} z, \quad (9)$$

here- ε is deformation of the rod axis; u_b is movement of the rod particle along the binormal; u_n is movement of the rod particle along the normal. The deformations of the axis of the rod are determined by (9) and takes the following form

$$\varepsilon = u' - kv. \quad (10)$$

If we use Hooke's law (8), then for internal points we get known formulas of power factors:

$$N = \int_{F_s} \sigma_s dF, M_n = \int_{F_s} (\sigma_s dF) z, \quad (11)$$

$$M_b = \int_{F_s} (\sigma_s dF) y, M_t = \tilde{G} \frac{\partial u_t}{\Delta s \partial s} \int_{F_s} R^2 dF.$$

Here- $\tilde{G}[\varphi(t)] = \frac{E_0}{2(1 + \nu)} \left[\varphi(t) - \int_0^t R_{0E}(t - \tau) \varphi(\tau) d\tau \right]$, $\varphi(t)$ - an arbitrary function of time.

The force factors (11) can be brought into a form convenient for calculation using the above ratios (8)- (10)

$$\begin{aligned} N &= E_0 \left[(F_s \varepsilon - F_n \frac{\partial u_n}{\partial s} - F_b \frac{\partial u_b}{\partial s}) - \int_0^t R_{0nb}(t - \tau) (F_s \varepsilon(s, \tau) - F_n \frac{\partial u_n(s, \tau)}{\partial s} - F_b \frac{\partial u_b(s, \tau)}{\partial s}) d\tau \right] \\ M_b &= E_0 \left[(F_b \varepsilon - J_{bn} \frac{\partial u_n}{\partial s} - J_b \frac{\partial u_b}{\partial s}) - \int_0^t R'_{0nb}(t - \tau) (F_b \varepsilon - J_{bn} \frac{\partial u_n}{\partial s} - J_b \frac{\partial u_b}{\partial s}) d\tau \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$M_n = E_0 \left[\begin{aligned} & (F_n \varepsilon - J_n \frac{\partial u_n}{\partial s} - J_{bn} \frac{\partial u_b}{\partial s}) - \\ & - \int_0^t R_{0nb}''(t-\tau) (F_n \varepsilon - J_n \frac{\partial u_n}{\partial s} - J_{bn} \frac{\partial u_b}{\partial s}) d\tau \end{aligned} \right]$$

$$M_t = \frac{E_0 J_t}{2\Delta s (1+\nu)} \left[\frac{\partial u_t(s,t)}{\partial s} - \int_0^t R_{0E}(t-\tau) \frac{\partial u_t(s,\tau)}{\partial s} d\tau \right]$$

Here $F_n = \int_{F_s} z dF_s, F_b = \int_{F_s} y dF_s,$

$$J_b = \int_{F_s} y^2 dF_s, J_n = \int_{F_s} z^2 dF_s, J_{bn} = \int_{F_s} xy dF_s, J_t = \int_{F_s} (y^2 + z^2) dF_s$$

axial, centrifugal and polar moment of inertia of the section.

If we use (1), (7) and (12), then we get the following system of integro-differential equations

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial s} - kQ_n - \rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + q_t &= 0, \\ \frac{\partial Q_n}{\partial s} + kN - Q_b \tau - \rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + q_n &= 0, \\ \frac{\partial Q_b}{\partial s} + Q_n \tau - \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + q_b &= 0, \\ \frac{\partial M_t}{\partial s} + M_n k - J_t \rho \frac{\partial^2 u_t}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial M_n}{\partial s} + M_t k - M_b \tau - Q_b l - J_n \rho \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial M_b}{\partial s} + M_n \tau - Q_n l_1 - J_b \rho \frac{\partial^2 u_b}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$u_n - w' + \tau v = 0,$$

$$u_b - v' + ku - \tau w = 0,$$

$$\begin{aligned} F_s(u' - kv) - F_n \frac{\partial u_n}{\partial s} - F_b \frac{\partial u_b}{\partial s} - \\ - \int_0^t R_{0nb}(t-\tau) (F_s(u' - kv) - F_n \frac{\partial u_n(s,\tau)}{\partial s} - F_b \frac{\partial u_b(s,\tau)}{\partial s}) d\tau - \frac{N}{E_0} &= 0, \\ F_b(u' - kv) - J_{bn} \frac{\partial u_n}{\partial s} - J_b \frac{\partial u_b}{\partial s} - \\ - \int_0^t R'_{0nb}(t-\tau) (F_b(u' - kv) - J_{bn} \frac{\partial u_n}{\partial s} - J_b \frac{\partial u_b}{\partial s}) d\tau - \frac{M_b}{E_0} &= 0, \\ F_n(u' - kv) - J_n \frac{\partial u_n}{\partial s} - J_{bn} \frac{\partial u_b}{\partial s} - \\ - \int_0^t R''_{0nb}(t-\tau) (F_n(u' - kv) - J_n \frac{\partial u_n}{\partial s} - J_{bn} \frac{\partial u_b}{\partial s}) d\tau - \frac{M_n}{E_0} &= 0, \\ \frac{\partial u_t(s,t)}{\partial s} - \int_0^t R_{0E}(t-\tau) \frac{\partial u_t(s,\tau)}{\partial s} d\tau - \frac{2M_t \Delta s (1+\nu)}{E_0 J_t} &= 0. \end{aligned}$$

Boundary and initial conditions must be applied to the system of integro-differential equations (13). Six conditions are placed on each end of the rod. Initial conditions are set for displacements and velocities at $t=0$:

$$\begin{aligned} u(s, 0) = u_c(s), v(s, 0) = v_c(s), w(s, 0) = w_c(s), \\ \dot{u}(s, 0) = \dot{u}_c(s), \dot{v}(s, 0) = \dot{v}_c(s), \dot{w}(s, 0) = \dot{w}_c(s). \end{aligned} \quad (14)$$

Here- $u_c(s), v_c(s), w_c(s), \dot{u}_c(s), \dot{v}_c(s), \dot{w}_c(s)$ given coordinate functions.

Assume that the binormal and normal vectors are directed along the central axes of inertia of the cross-section of a curved rod. Then the static moments and the centrifugal moment of the cross-section of the curved rod are zero.

Then the system of integro-differential equations (13) is simplified and takes the following form

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N}{\partial s} - kQ_n - \rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + q_t &= 0, \\
\frac{\partial Q_n}{\partial s} + kN - Q_b \tau - \rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + q_n &= 0, \\
\frac{\partial Q_b}{\partial s} + Q_n \tau - \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + q_b &= 0, \\
\frac{\partial M_t}{\partial s} + M_n k - J_t \rho \frac{\partial^2 u_t}{\partial t^2} &= 0, \\
\frac{\partial M_n}{\partial s} + M_t k - M_b \tau - Q_b l - J_n \rho \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} &= 0, \\
\frac{\partial M_b}{\partial s} + M_n \tau - Q_n l_1 - J_b \rho \frac{\partial^2 u_b}{\partial t^2} &= 0, \\
u_n - w' + \tau v &= 0, \\
u_b - v' + ku - \tau w &= 0, \\
\frac{\partial u}{\partial s} = \frac{N}{E_0 F_s} + kv(s, t) - \int_0^t R_{0nb}(t - \tau) \left(kv(s, \tau) - \frac{\partial u(s, \tau)}{\partial s} \right) d\tau &= 0, \\
\frac{\partial u_t(s, t)}{\partial s} = \int_0^t R_{0E}(t - \tau) \frac{\partial u_t(s, \tau)}{\partial s} d\tau + \frac{2M_t \Delta s (1 + \nu)}{E_0 J_t} &= 0, \\
\frac{\partial u_n}{\partial s} = - \int_0^t R''_{0nb}(t - \tau) \left(\frac{\partial u_n}{\partial s} \right) d\tau - \frac{M_n}{E_0 J_n}, \\
\frac{\partial u_b}{\partial s} = - - \int_0^t R'_{0nb}(t - \tau) \left(\frac{\partial u_b}{\partial s} \right) d\tau - \frac{M_b}{E_0 J_b} &
\end{aligned} \tag{15}$$

Boundary and initial conditions are set to solve the problem.

Boundary (boundary) conditions. The possible boundary conditions for solving the problem can be divided into two classes: homogeneous and inhomogeneous. For a spatial curved rod, the total number of boundary conditions is 12 (6 conditions at the right end and 6 at the left end of the rod).

For the cantilever rod we have the following boundary conditions: $\vec{u}(u, v, w) = \mathbf{0}, \vec{u}_s(u_n, u_b, u_t) = \mathbf{0}$ for a fixed edge; a load is applied to the other end of the rod $\vec{Q} = \vec{P}, \vec{M} = \vec{T}$. Here \vec{P}, \vec{T} - the specified load.

III. Results and analysis

As an example, consider the natural oscillations of a curved rod, shown in Fig. 2. To do this, 6 boundary conditions are placed at the two ends of the rod. The above equations (15) consist of 12 equations. To solve the system (15), the freezing method is first applied. Then we get a system of differential equations with variable coefficients. With natural oscillations, equations (15) in matrix form take the following form

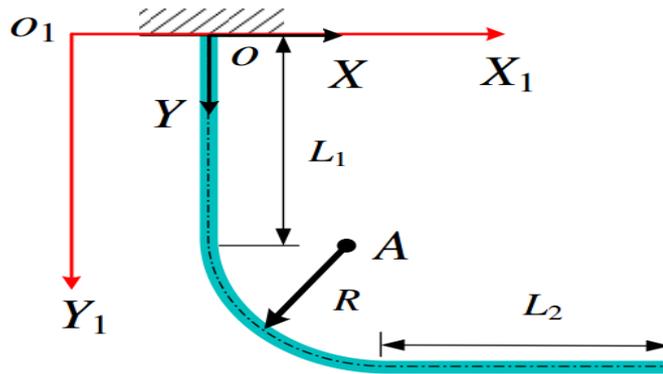


Fig. 2. Elementary part of a curved rod

$$\frac{d\vec{z}}{d\zeta} - ([B^0 - C(\zeta)] - \omega^2 [M^0 - M^1(\zeta)]) [R_m]^{-1} \vec{z} = \mathbf{0}$$

The solution of this equation in vector form has the following form

$$\vec{z} = \vec{C} e^{-\int_{\zeta_0}^{\zeta} \frac{([B^0 - C(\zeta)] - \omega^2 [M^0 - M^1(\zeta)]) \zeta}{[R_m]} d\zeta}.$$

As an example of a viscoelastic material, we take the three – parametric Koltunov - Rzhnitsyn relaxation kernel: $R_{0E}(t) = A_{\kappa} e^{-\beta_{\kappa} t} / t^{1-\alpha_{\kappa}}$ with parameters $A_{\kappa} = 0,048$; $\beta_{\kappa} = 0,05$; $\alpha_{\kappa} = 0,1$. Geometric and physico-mechanical parameters take the following values: $L_1 = L_1 = 0,9\text{ м}$; $R = 0,127\text{ м}$; $E = 210\text{ ГПа}$; $\rho = 7800\text{ кг} / \text{м}^3$. To solve the problem, the methods of freezing, orthogonal running, the Muller method, the Gauss method and the method of complex amplitudes are used. The results of calculations of the first four complex natural frequencies, for cantilever rods, are shown in Fig. 2 and in table 1.

The second line shows the results of the frequencies of viscoelastic curved rods obtained by the proposed method. В третьей и четвёртой строках результаты De Jong [15], Wu J.H.[16] and [17-20] для упругих криволинейных стержней. Установлено, что учёт вязких свойств материала снижает соответствующие моды частот до 15%.

TABLE 1.
COMPARISON OF THE FIRST FOUR NATURAL FREQUENCIES

1	Fashion Number	1	2	3	4
2	Proposed methodology	31,5243+i0.2315	68,2819+i0.8942	405,4442+i7,8864	501,3458+i9.7194
3	De Jong [15]	28,4581	62,1266	375,1074	480,4582
4	Wu J.H.[16]	30,2065	65,1195	387,1324	496,5243

IV. Conclusions

Thus, the paper has developed a solution technique and an algorithm for studying the natural oscillations of curved deformable rods. With the growth of its own motion, the attenuation decrements increase in the presence of the viscosity of the rod and decrease in the presence of the external viscosity of the Winkler base. Moreover, with an increase in intensive dissipation, aperiodic modes (purely imaginary eigenvalues) arise, starting with the highest eigenforms, in the case of taking into account the viscosity of the rod. By taking into account energy dissipation, the viscoelastic rod model makes it possible to study forced steady-state oscillations at resonances.

References

- Einbinder A. B., Kamerstein A. G. Calculation of trunk pipelines for strength and stability. Moscow: Nedra, 1982. 340 p.
- Safarov I. I., Teshaev M. H., Boltaev Z. I. Wave processes in a mechanical waveguide. Fundamentals, concepts, methods. Germany, LAP, Lambert Academic Publishing, 2012. 220 p.
- Wang Y., Wang L., Ni Q., Yang M., Liu D., Qin T. Non-smooth dynamics of articulated pipe conveying fluid subjected to a one-sided rigid stop // Appl. Math Model. 2021. Vol. 89. Pp. 802-818.
- Abdollahi, R., Dehghani Firouz-abadi, R., Rahmanian, M. On the stability of rotating pipes conveying fluid in annular liquid medium // J. Sound Vib. 2021. Vol. 494, 115891
- Yamashita, K., Nishiyama, N., Katsura, K., Yabuno, H. Hopf-Hopf interactions in a spring supported pipe conveying fluid // Mech Syst Signal Pr. 2021. Vol. 152. 107390.
- Svetlitsky V. A. Mechanics of pipelines and hoses. Moscow, Mechanical engineering. 1982. 280 p.
- Mao X. Y., Ding H., Chen L. Q. Steady-state response of a fluid-conveying pipe with 3:1 internal resonance in supercritical regime // Nonlinear Dyn. 2016. Vol. 86, is. 2. Pp. 795–809.
- Chen W., Hu Z., Dai H., Wang L. Extremely large-amplitude oscillation of soft pipes conveying fluid under gravity // Appl. Math. Mech-Engl. 2020. Vol. 41, is. 9. Pp.1381–1400.
- Li, S.J., Liu, G.M., Kong, W.T. Vibration analysis of pipes conveying fluid by transfer matrix method // Nucl Eng Des. 2014. Vol. 266. Pp.78–88.
- Vasin By Himself., Vasina M. V., In Yolks.I., Chan Thanh Hai. Analysis of dynamic states of curved rods. // In the collection "Winter School on continuum mechanics (fifteenth). Collection of articles", Perm: UrO RAS, 2007. 174 p.
- Safarov I., Teshaev M., Marasulov A., Juraev T., Raxmonov B. Vibrations of Cylindrical Shell Structures Filled with Layered Viscoelastic Material // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 264. 01027. DOI: 10.1051/e3sconf/202126401027.
- Safarov I.I., Teshaev M.Kh., Yarashev J.A. Vibration of multilayer composite viscoelastic curved pipe under internal pressure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030, is. 1. 012073. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012073.
- Sharipov R. A. Course of differential geometry: textbook for universities // Bashkir University edition. Ufa, 1996. 211 p.

14. Koltunov M. A. Creep and relaxation. Moscow, Higher School, 1976. 251 p.
15. Safarov I. I., Homidov F. F., Rakhmonov B. S., Almuratov Sh. N. Seismic vibrations of complex relief of the surface of the naryn canyon (on the Norin river in Kyrgyzstan) during large-scale underground explosions // Journal of Physics Conference Series. 2020. Vol. 1706, is. 1. 012125. DOI: 10.1088/1742-6596/1706/1/012125.
16. Safarov I. I., Teshayev M. K., Boltaev Z. I. Propagation of linear waves in multilayered structural - Inhomogeneous cylindrical shells. Journal of Critical Reviews. 2020. Vol. 7, is. 12. Pp. 893–904. DOI: 10.31838/jcr.07.12.157.
17. Mirsaidov M., Safarov I., Boltayev Z., Teshayev M. Spread waves in a viscoelastic cylindrical body of a sector cross section with cutouts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869, is. 4. 042011. DOI: 10.1088/1757-899X/869/4/042011.
18. Mirsaidov M., Teshayev M., Ablokulov S., Rayimov D. Choice of optimum extinguishers parameters for a dissipative mechanical system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 883, is.1. 012100/ DOI: 10.1088/1757-899X/883/1/012100.
19. De Jong C.A.F. Analysis of Pulsation and Vibration in Fluid-Filled Pipe Systems. PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.1994.
20. Wu J. H., Tijsseling A. S., Sun Y. D., Yin Z. Y. In-plane wave propagation analysis of fluidfilled L-Shape pipe with multiple supports by using impedance synthesis method // Int. J. Pre. Ves. Pip. 2020. Vol. 188. 104234.

УДК 519.7

Алгоритм определения сходства векторов на основе анализа пар местоположений и значений элементов

Algorithm for determining the similarity of vectors based on the analysis of pairs of positions and values of elements

М. Т. Тухтасинов

Наманганский инженерно-строительный институт, г. Наманган, Узбекистан

M. T. Tukhtasinov

Namangan Engineering Construction Institute, Namangan, Uzbekistan

Аннотация. В статье предлагается новый метод определения сходства двух векторов. Сначала элементы обоих векторов сортируются. Сходство векторов определяется путем вычисления взаимных разностей пар местоположений и значений элементов упорядоченных векторов.

Ключевые слова: вектор, сортировка, местоположения элементов, значения элементов, пары местоположений элементов, сходство векторов.

Abstract. The article proposes a new method for determining the similarity of two vectors. First, the elements of both vectors are sorted. The similarity of vectors is determined by calculating the mutual differences of pairs of positions and values of elements of ordered vectors.

Keywords: vector, sorting, element position, element values, pairs of element positions, vector similarities.

I. Введение

В настоящее время существует множество научных и практических задач, связанных с оценкой взаимосвязь (например, сходства) векторов. Для решения таких задач мировыми учеными разработан ряд методов и алгоритмов, которые используются в различных научных и практических задачах [1-5]. Однако разработка более надежных методов в этом направлении является актуальной задачей. В ходе нашего исследования мы разработали новый метод сравнения сходства двух векторов. Метод описан в следующих разделах.

II. Постановка задачи

Предположим, нам даны N -мерные множества $A = \{a_i\}_{i=1}^N$ и $B = \{b_i\}_{i=1}^N$, т.е. два вектора, элементами которых являются числа. В качестве примера рассмотрим график (гистограмму) двух векторов A и B размером $N=40$, элементы вектора которого состоят из значений в диапазоне $0 \div 255$ (Рис. 1).

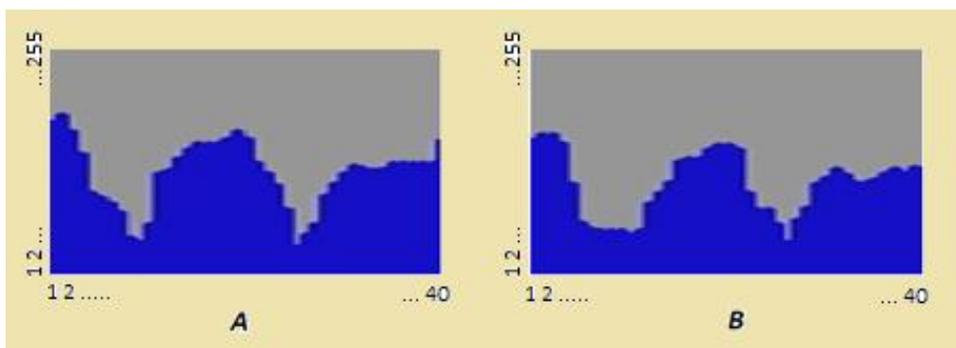


Рис. 1. Пример: график двух векторов A и B размером $N=40$

Итак, нам нужно найти степень подобия двух векторов. Для этого мы разработали алгоритм, который приведен в следующем разделе.

III. Алгоритм решения задач

Сортируем оба вектора (например, по возрастанию). В результате получаем упорядоченные векторы $A^{(s)}$ и $B^{(s)}$ (Рис. 2).

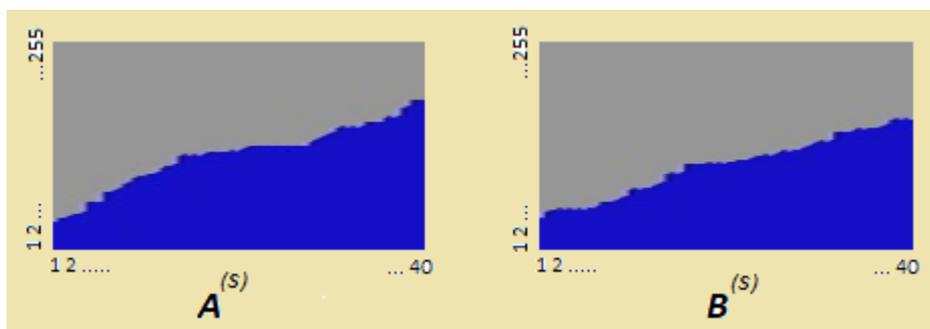


Рис. 2. Упорядоченные векторы

При сортировке векторов необходимо не терять старые позиции (местоположение) элементов вектора. В этом случае у нас будут пары новых и старых позиций для элементов упорядоченного вектора (Рис. 3). На Рис.3 число в скобках — это старое местоположение векторного элемента. Из примера на рисунке видно, что элемент в позиции 35 неупорядоченного вектора является наименьшим, и в новом отсортированном векторе он попадает на позицию 1, а значение в позиции 9 попадает на позицию 2 и так далее.

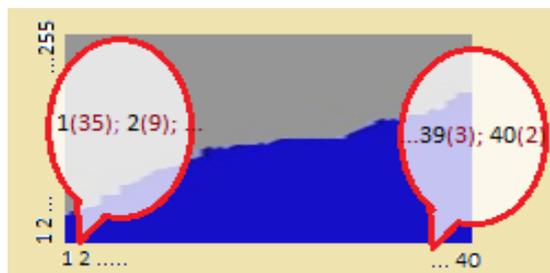


Рис. 3. Пары (новых и старых) позиций в упорядоченном векторе

Итак, для сравнения векторов A и B был разработан следующий алгоритм, работающий с их упорядоченными векторами $A^{(s)}$ и $B^{(s)}$.

Алгоритм “Сравнение упорядоченных векторов”:

1. Введем следующие обозначения для пар позиций упорядоченных элементов вектора: i - новая позиция векторного элемента, j - старая позиция векторного элемента.

2. $Sum^{(i)} = 0$ для суммирования различий в новых позициях i .

3. $Sum^{(j)} = 0$ для суммирования различий в значениях элементов.

4. **Начало цикла** по позициям i в $A_{i,j}^{(s)}$; $i \in [1, N; 1]$.

5. Позиция j в $A_{i,j}^{(s)}$ ищется из $B_{i,j}^{(s)}$ (во внутреннем цикле). При нахождении, т.е. в случае, когда $j^{(a^s)} = j^{(b^s)}$:

1) Вычисляется разница между i – местами векторов A и B , т.е.:

$$d^{(i)} = |i^{(a^s)} - i^{(b^s)}| \quad (1)$$

2) Вычисляется разница между значениями элементов на i -х местах, т.е.:

$$d^{(v)} = |a_i^{(s)} - b_i^{(s)}| \quad (2)$$

6. $Sum^{(i)} = Sum^{(i)} + d^{(i)}$.

7. $Sum^{(v)} = Sum^{(v)} + d^{(v)}$

8. Если $i < N$, то $i = i + 1$ и перейти к шагу 5. В противном случае **цикл завершается**.

9. Вычисляем итоговую разницу по позициям (учитывая, что результат находится в диапазоне $0 \div 100$):

$$S^{(i)} = 100 - 2 \cdot \frac{Sum^{(i)} \cdot 100}{N^2} \quad (3)$$

10. Вычисляем итоговую разницу по значениям элементов (учитывая, что результат находится в диапазоне $0 \div 100$):

$$S^{(v)} = 100 - 2 \cdot \frac{Sum^{(v)} \cdot 100}{255 \cdot N} \quad (4)$$

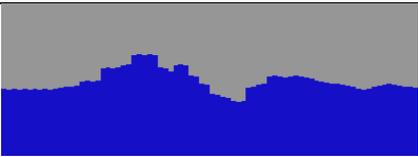
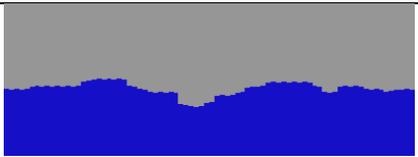
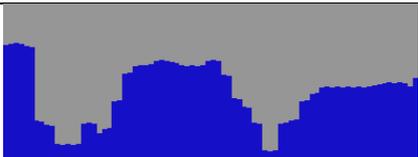
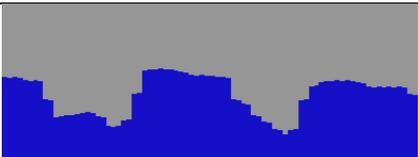
11. Определим общую разность, то есть конечную степень сходства, по двум различиям, т. е. позициям (i) и значениям (v) . Значения 0,8 и 0,2 были получены экспериментально в качестве весов для разностей $S^{(i)}$ и $S^{(v)}$.

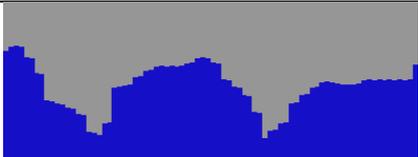
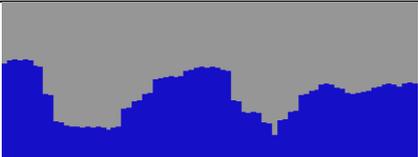
$$D^{(A,B)} = 0,8 \cdot S^{(i)} + 0,2 \cdot S^{(v)} \quad (5)$$

IV. Анализ полученных результатов

По приведенному выше алгоритму были получены результаты подобиия при разных значениях векторов A и B . В таблице ниже (Табл. 1) показаны некоторые из полученных результатов. Как видно из результатов, результаты были удовлетворительными.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ВЕКТОРОВ A И B

Значения вектора A и его графика	Значения вектора B и его графика	Степень сходства A и B
 111,111,111,111,111,111,114,116,125,125,147,147,152,169,169,147,141,152,133,119,103,97,91,91,114,119,133,130,133,130,125,122,119,116,111,111,116,119,116,114	 112,112,112,116,116,116,116,116,125,128,128,128,116,112,107,107,107,85,83,83,89,101,101,107,114,116,123,123,123,123,116,107,107,116,116,112,112,107,110,112	51,74
 188,191,186,67,61,30,30,30,64,47,55,100,144,155,158,164,161,155,155,155,164,141,103,89,64,19,19,64,69,100,111,122,122,122,122,122,125,128,128,122	 136,136,132,132,101,72,76,78,81,74,58,58,69,112,148,150,148,145,141,141,139,136,101,94,76,65,54,45,54,101,123,130,132,132,128,121,121,121,121,110	74,53

 <p>175,183,164,139,94,89,83,72,44,39,58,116,119,133,144,150,150,150,155,164,155,128,116,103,75,33,47,58,91,105,116,125,122,119,122,128,128,128,128,128</p>	 <p>154,161,161,150,105,60,54,51,51,51,47,51,83,94,107,130,134,134,143,148,148,143,94,76,76,58,38,63,78,105,112,121,114,107,107,110,116,121,116,123</p>	84,31
 <p>175,183,164,139,94,89,83,72,44,39,58,111,119,133,144,150,150,150,155,174,155,128,116,103,75,33,47,58,91,125,116,125,122,119,127,128,128,128,128,120</p>	 <p>185,183,164,142,94,89,83,75,44,39,58,116,119,133,144,155,150,150,155,164,155,128,116,103,85,33,47,58,91,105,116,125,122,119,122,128,128,137,128,128</p>	96,54

V. Заключение

Результаты тестирования на основе алгоритма были удовлетворительными. В настоящее время мы проводим исследования по дальнейшему совершенствованию этого алгоритма. В частности, рассматривается вопрос усовершенствования расчета весов разностей $S^{(i)}$ и $S^{(v)}$.

На наш взгляд, этот метод может быть эффективно использован в различных научных и практических задачах, связанных со сравнением цифровых векторов, в частности, распознаванием образов.

Список литературы

1. Кухарев Г. А. Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека. СПб.: Политехника, 2001. 239 с.
2. Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital Image Processing, Prentice Hall. 2002. 793 p.
3. Pratt William K. Digital image processing: PIKS Scientific inside. 2007. 782 p.
4. Tukhtasinov M. T., Mirzaev N., Narzulloev O. M.. Face recognition on the base of local directional patterns // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, 2016). DOI: 10.1109 / Dynamics. 2016. 7819101, Publisher: IEEE.
5. Mumtozali Tukhtasinov. Algorithms for selecting and comparing features of digital image vectors based on the analysis of local extrema // The 14th International Conference on Intelligent Human-Computer Interaction (IHCI-2022). October 20th-22nd, 2022 Tashkent, Uzbekistan.

УДК 004.891.2

Оценка точностных характеристик методов машинного обучения в задаче прогнозирования положения и поведения особей крупного рогатого скота
Evaluation of the accuracy characteristics of the machine learning methods in the problem of predicting the position and behavior of cattle

Д. Н. Шлома

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

D. N. Shloma

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В исследовании показана оценка точностных характеристик методов машинного обучения в задаче прогнозирования положения и поведения особей крупного рогатого скота. В исследовании продемонстрировано формирование наборов данных для обучения и тестирования и построение

прогностической модели. В результате были исследованы четыре алгоритма машинного обучения (случайный лес, метод ближайших соседей, алгоритм экстремального повышения и машина опорных векторов) и определены точностные характеристики каждого из них, при прогнозировании положения и поведения особей крупного рогатого скота.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, внутрижелудочный болюс, прогнозирование, положение и поведение, машинное обучение.

Abstract. Classification according to the identified traits of cattle allows you to identify diseases, unfavorable living conditions and abnormal feed intake in animals. The study provides a description of the observed phenomenon according to the identified signs and proposes to use support vector machines for the study, the input data for which are the time series of accelerations with an intraventricular bolus. The study presents the results of experiments and shows the identification of such behavioral features as: standing, lying, feeding and walking with the results: average sensitivity and accuracy of respectively. Further ways of improving the proposed classification method are given.

Key words: cattle, intragastric bolus, forecasting, position and behavior, machine learning

I. Введение

Животноводство с годами изменилось, увеличилось количество особей крупного рогатого скота (КРС) на ферму; эта тенденция резко сократила время, которое фермеры и рабочие тратят на наблюдение за животными, контроля их содержания и управления. Чтобы компенсировать этот недостаток, фермеры прибегают к технологиям, которые помогают им гарантировать постоянный контроль многих факторов, таких как условия содержания, качество и консистенцию корма и здоровья животных [1]. В связи с этим, знание времени, проведенного животным в положении стоя или лежа, во время кормления или руминации, имеет решающее значение для обнаружения начала заболевания и помощь в кормлении и управлении стадом. Измерение периодов лежания, стояния и пережевывания пищи особями КРС, могут быть важной информацией для управления животными и мониторинга их благополучия. Среди технологий, применяемых для решения этой задачи, наибольшее распространение имеют датчики ускорения, располагаемые на теле (шея, левый бок, нога) особей КРС. Эти датчики, при их совместном использовании, показали свою эффективность в обнаружении поведения особей КРС, такого как руминация, кормление, лежание или ходьба. Однако такое использование, влечет за собой большие финансовые затраты и доставляет неудобства животному, поскольку датчики ускорения на теле особей КРС, причиняют им неудобства, склонны к утере или повреждению в ходе социального взаимодействия [2].

Следовательно, в задаче прогнозирования положения и поведения особей КРС, целесообразно исследовать возможность использования датчика ускорения, располагаемого внутри тела каждой особи КРС в единственном экземпляре.

II. Постановка задачи

В работах исследователей [3] приводится информация о классификации пищевого поведения особей КРС, за счет анализа временных рядов ускорений, предоставляемых внутрижелудочным болюсом (ВЖБ), который установлен внутри желудка каждой контролируемой особи КРС. Следовательно, в настоящем исследовании, ставится цель разработать модель для определения положения и поведения особей КРС на основе временных рядов ускорений с ВЖБ и выполнить оценку точностных характеристик используемых методов машинного обучения.

III. Теория

Для сравнения общей способности различных моделей предсказывать положение или поведение животного, требуется рассчитать: коэффициент Каппа-Коэна, точность, нижнюю и верхнюю границу точности и точность р-значения. Верхняя и нижняя граница точности рассчитываются с учетом доверительного интервала 95,0%. Доверительный интервал для показателя точности использует метод биномиального доверительного интервала. Относительно коэффициента Каппа-Коэна, определяет оценку согласия между алгоритмом и результатами наблюдения, с поправкой на гипотетическую вероятность случайного совпадения.

Точность это количество истинно положительных (TP), истинно отрицательных (TN), ложноположительных (FP) и ложноотрицательных (FN). Для каждой модели были рассчитаны чувствительность (Se), специфичность (Sp), точность (Pr), распространённость (Pre), положительная прогностическая ценность (PPV) и отрицательная прогностическая ценность (NPV) для определения каждого положения или поведения. Эти параметры рассчитывались по следующим выражениям:

$$Se = \frac{TP}{TP + FN}, \quad Sp = \frac{TN}{TN + FP},$$

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP}, \quad NPV = \frac{TN}{TN + FN}$$

Для поиска наиболее подходящего алгоритма прогнозирования, как положения, так и поведения особей КРС, были рассмотрены четыре различных алгоритма: машина опорных векторов (SVM), случайный лес (RF), К ближайших соседей (KNN) и алгоритм экстремального повышения (XGB). Как показывают результаты поиска, эти алгоритмы ранее использовались исследователями [4] для классификации поведения коров.

IV. Результаты экспериментов

Результаты численного моделирования, показывают, что моделью с наилучшими точностными характеристиками является XGB с точностью 99,2% и самым высоким значением коэффициента Каппа Коэна. Точность других различных моделей прогнозирования поведения особей КРС находится в диапазоне от 0,676 до 0,759, где значения наименьшей точности и коэффициента Коэна-Каппа относятся к модели SVM, а наивысшее значение к RF модели. Результаты расчетов приведены в табл. 1

ТАБЛИЦА 1
ТОЧНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ

Модель	Точность	Коэна-Каппа	Диапазон точности		Точность р-значение
			Нижняя граница	Верхняя граница	
RF	0,687	0,685	0,922	0,671	0,926
KNN	0,587	0,597	0,951	0,706	0,923
XGB	0,657	0,964	0,956	0,915	0,982
SVM	0,578	0,601	0,987	0,873	0,945

Модель – модель алгоритма, используемого для анализа данных; RF – случайный лес; KNN – К-ближайших соседей; XGB – экстремального градиента; SVM – машины опорных векторов.

В табл. 2 поведение, предсказываемое с наивысшей сбалансированной точностью, представляет собой параметры с соответствующими значениями: Re (0,927–0,962); F (0,729–0,803), Ss (0,716–0,800), F (0,735–0,805) и M (0,689 –0,774). Модель RF привела к наивысшей сбалансированной точности, чувствительности, прецизионности и NPV при прогнозировании поведения (F, M, Re, Ru, Ss), тогда как для прогнозирования Re и Ru самая высокая сбалансированная точность, чувствительность и NPV были достигнуты с использованием модели XGB. В целом KNN и SVM оказались менее эффективными в прогнозировании рассматриваемого поведения по сравнению с RF и XGB [5].

ТАБЛИЦА 2
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, СПЕЦИФИЧНОСТЬ, ТОЧНОСТЬ, ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ, РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ

Поведение	Модель	Se	Sp	Pr	NPV	Pre	BA
F	RF	0,685	0,922	0,671	0,926	0,189	0,803
M	RF	0,597	0,951	0,706	0,923	0,164	0,774
Re	RF	0,964	0,956	0,915	0,982	0,331	0,960
Ru	RF	0,601	0,987	0,873	0,945	0,125	0,794
Ss	RF	0,718	0,881	0,588	0,930	0,191	0,800
F	KNN	0,587	0,902	0,583	0,904	0,189	0,745
M	KNN	0,518	0,926	0,579	0,907	0,164	0,722
Re	KNN	0,918	0,936	0,877	0,959	0,331	0,927
Ru	KNN	0,618	0,950	0,641	0,946	0,125	0,784
Ss	KNN	0,545	0,887	0,531	0,892	0,191	0,716
F	XGB	0,627	0,917	0,638	0,914	0,189	0,772
M	XGB	0,563	0,945	0,666	0,917	0,164	0,754
Re	XGB	0,964	0,960	0,922	0,982	0,331	0,962
Ru	XGB	0,627	0,982	0,834	0,948	0,125	0,805
Ss	XGB	0,669	0,866	0,542	0,917	0,191	0,768
F	SVM	0,549	0,910	0,587	0,897	0,189	0,729

M	SVM	0,415	0,962	0,681	0,893	0,164	0,689
Re	SVM	0,933	0,924	0,858	0,965	0,31	0,928
Ru	SVM	0,487	0,983	0,809	0,930	0,125	0,735
Ss	SVM	0,705	0,810	0,468	0,921	0,191	0,758

Se – чувствительность, Sp – специфичность, Pr – точность, NPV – отрицательно прогностическое условие, Pre – распространённость, BA – сбалансированная точность

В табл. 3 показана матрица путаницы для каждой модели, примененной к набору данных тестирования для прогнозирования поведения. Даже в наиболее точной модели RF, поведение в некоторых случаях неправильно классифицируется: поведение при кормлении прогнозируется как стояние на месте (21,7%) или движение (9,45%); поведение в движении прогнозируется как кормление (17,7%) или стояние на месте (21,3%); поведение в состоянии покоя прогнозируется как размышление (2,60%); стояние на месте ошибочно классифицируется как еда (16,0%) или движение (10,8%).

ТАБЛИЦА 3
МАТРИЦА ПУТАНИЦЫ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ

Модель	Прогнозируемое	Действительное					
		F	M	Re	Ru	Ss	Всего
RF	F	978	220	8	20	232	1458
RF	M	135	742	3	15	156	1051
RF	Re	4	9	2412	207	8	2637
RF	Ru	1	6	65	570	11	653
RF	Ss	310	265	13	140	1038	1766
KNN	F	839	251	18	34	297	1439
KNN	M	202	643	18	29	218	1110
KNN	Re	28	24	2296	219	52	2619
KNN	Ru	48	40	150	587	91	916
KNN	Ss	311	284	19	80	787	1481
XGB	F	896	202	5	21	280	1404
XGB	M	161	699	7	11	171	1049
XGB	Re	3	13	2410	182	6	2614
XGB	Ru	8	20	69	595	21	713
XGB	Ss	360	308	10	140	967	1785
SVM	F	784	272	16	18	246	1336
SVM	M	115	516	10	7	110	758
SVM	Re	14	28	2334	286	59	2721
SVM	Ru	1	15	82	462	11	571
SVM	Ss	514	411	59	176	1019	2179
Всего	–	1428	1242	2501	949	1445	–

Модель – модель алгоритма, используемого для анализа данных; RF – случайный лес; KNN – К-ближайших соседей; XGB – экстремального градиента; SVM – машины опорных векторов.

V. Обсуждение результатов

Прогноз положения был точным для всех моделей, но особенно для модели экстремального повышения (XGB), и оказался гораздо более точным и чувствительным, чем в исследованиях, где датчик ускорения располагался на шее особи КРС [2] – чувствительность при этом составила 0,80 и 0,77 соответственно и точность 0,80 и 0,98. Результат с меньшей чувствительностью (0,94) и точностью (0,96) был получен исследователями, установившими датчик ускорения на ушную бирку особи КРС [6].

VI. Заключение

В исследовании показана разработка модели для определения положения и поведения особей крупного рогатого скота на основе временных рядов ускорений от внутрижелудочного болюса и приведена оценка ее точности. Научная новизна исследования заключалась в достижении высокой точности определения пяти различных моделей поведения и положения особей КРС с помощью одного датчика, что позволило существенно повысить экономический эффект от функционирования предприятия молочного скотоводства. В исследовании продемонстрировано формирование наборов данных для обучения и тестирования и построение прогностической модели. В результате были исследованы четыре алгоритма машинного обучения (случайный лес, метод ближайших соседей, алгоритм экстремального повышения и машина опорных векторов) и

определены точностные характеристики каждого из них, при прогнозировании положения и поведения особей крупного рогатого скота.

Список литературы

1. Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang, Chih-Jen Lin. «LIBSVM: A library for support vector machines». March 4. 3013.
2. Cortes C., Vapnik V. Support-vector network. Machine Learning, Kluwer Academic Publishers. 1995. 20. 273–297.
3. Shigeo Abe. Support Vector Machines for Pattern Classification // Advances in Pattern Recognition, Springer, Heidelberg.
4. Антонов Л. В. Разработка и апробация алгоритмов выделения комплексных показателей состояния здоровья вымени животных на основе анализа данных с сенсоров предприятия молочного животноводства // Вестник ЧГУ. 2017. №1. С. 19–21.
5. Tan T. D., Ha L. M., Long N. T., Duc N. D., Thuy N. P. Integration of inertial navigation system and global positioning system: Performance analysis and measurements. International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS). Pp. 1047–1050.
6. Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang, and Chih-Jen Lin «A Practical Guide to Support Vector Classification». May 19. 2016.

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарный доклад

П. А. Батраков, К. О Почекуева Использование золы угольных ТЭС. Как минусы превратить в плюсы	3
--	---

Секция. Электромеханическое, теплоэнергетическое оборудование и технологии

Ш. М. Гулямов, Н. Ж. Хожиева, Л. Т. Маришева, Н. П. Исхакова Оптимизация алгоритмов управления объектами с распределенными параметрами	7
---	---

Ю. В. Москалев Повышение эффективности транспорта электроэнергии с использованием трансформаторного преобразователя числа фаз и многофазной линии электропередачи	13
--	----

Ю. В. Москалев, Р. В. Сергеев, А. П. Попов Расчет параметров нерегулируемого устройства для компенсации реактивной мощности трехфазного асинхронного двигателя	18
---	----

Секция. Автоматизация. Контроль и испытания в промышленности

Н. В. Волкова Экспериментальные исследования определения продуктов коррозии в неоднородных железобетонных образцах методом лазерного атомно-эмиссионного спектрального анализа	23
---	----

А. А. Кузнецов, Г. В. Волчанин Анализ изображений поверхности железобетонных образцов подверженных коррозии	26
--	----

И. С. Кузнецов, Ф. Н. Притыкин Анализ положения геометрических объектов пространства приращений обобщенных координат механизма манипулятора экскаватора	31
--	----

Н. О. Разуев, Д. С. Макашин Стратегия внедрения цифровизации на заводах	37
--	----

О. В. Стукач, И. А. Ершов Одна модель канала связи забойной телеметрической системы	41
--	----

Секция. Микромеханические системы и элементы. Аддитивные технологии

Н. Е. Агарков Влияние компоновки катушек индуктивности на КПД антенного согласующего устройства электрически малой антенны ДКМВ диапазона	45
--	----

Е. В. Богданова, С. В. Белим Исследование поверхностного фазового перехода в антиферромагнитных пленках с помощью компьютерного моделирования	52
--	----

С. А. Варнаков, А. С. Яценко, С. В. Кривальцевич Диэлектрические характеристики образцов почв, отличающихся гранулометрическим составом, в широком диапазоне частот	57
--	----

Ю. И. Егошин, Д. А. Борейко Применение интегральных подстроечных конденсаторов для настройки LC-фильтров	61
А. С. Яценко, К. В. Немчанов О возможности использования уравнений тепло- и влагопереноса в пористых структурах при оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности в естественных условиях	65

Секция. Вычислительная математика

Р. Д. Алоев, М. Х. Овлаева, М. Нишоналиева Построение и исследование устойчивости разностной схемы для линейной гиперболической системы с динамическими граничными условиями	69
Р. Д. Алоев, В. Б. Алимова Исследование экспоненциальной устойчивости численного решения гиперболического уравнения с отрицательной нелокальной характеристической скорости и погрешностью измерения	71
В. В. Волоцуев, А. С. Танеева Системы коррекции низкой орбиты малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли	74
А. Б. Каршиев, А. А. Каюмов Компьютерное моделирование нестационарного взаимодействия ребристых оболочек с жидкостью	76
И. Мирзаев, Э. А. Косимов, Н. А. Нишонов, Е. В. Ан Сейсמודинамика сложных систем трубопроводов по записи реального землетрясения	81
Ф. М. Нуралиев, Н. Эгамбердиев, С. А. Тастанова Исследование влияния цветовых параметров на восприятие ковровых дизайнов с использованием фрактальных изображений	87
М. Олимов, С. Мухаммадамин угли Абдужалилов Математическое моделирование пространственного стержня при знакопеременном упруго-пластическом нагружении	91
Н. Равшанов, Т. Р. Шафиев, Ш. Э. Назаров, Б. Боборахимов Математическая модель процесс переноса и диффузия загрязняющих вредных веществ в атмосфере с учетом захвата аэрозольных частиц элементами растительности	97
И. И. Сафаров, М. Х. Тешаев, З. И. Болтаев, И. М. Каримов, Н. К. Эсанов Собственные и вынужденные колебания трубопроводов, контактирующих со средой Винклера	101
М. Т. Тухтасинов Алгоритм определения сходства векторов на основе анализа пар местоположений и значений элементов	108
Д. Н. Шлома Оценка точностных характеристик методов машинного обучения в задаче прогнозирования положения и поведения особей крупного рогатого скота	111