

**ДИНАМИКА СИСТЕМ,  
МЕХАНИЗМОВ И МАШИН**  
**DYNAMICS OF SYSTEMS,  
MECHANISMS AND MACHINES**

Издается с ноября 1995 года

Выходит один раз в год

**2023**

**Том 11, № 1**

Учредитель  
Омский государственный  
технический университет

Главный редактор  
В. Ф. Фелелов,  
и. о. ректора ОмГТУ

Редакционная коллегия:  
Е. Г. Андреева, доктор технических наук  
Ю. А. Бурьян, доктор технических наук  
А. В. Бубнов, доктор технических наук  
Л. Г. Варепо, доктор технических наук  
Е. Н. Ерёмин, доктор технических наук  
П. С. Ложников, доктор технических наук  
С. О. Подгорный, кандидат химических наук  
А. В. Зыкина, доктор физ.-мат. наук  
А. Г. Козлов, доктор технических наук  
И. В. Богачков, доктор технических наук  
В. А. Майстренко, доктор технических наук  
В. И. Трушляков, доктор технических наук

Ответственный секретарь  
И. М. Чумаченко, ведущий инженер  
научно-аналитического отдела ОмГТУ

Компьютерная верстка  
Ю. П. Шелехиной

Язык публикаций:  
русский, английский

Дата и номер договора о включении  
рецензируемого научного издания в систему  
Российского индекса научного цитирования:  
213-04/2014 от 14.04.2014

Адрес в РИНЦ:  
[http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=50500](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=50500)

Адрес редакции:  
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, каб. Г-209  
Контактный телефон:  
(3812) 65-35-36  
E-mail: [dynamics2016@omgtu.ru](mailto:dynamics2016@omgtu.ru)  
Телефон для рекламодателей: 65-35-36

© ОмГТУ, 2023

Подписано в печать 20.12.2023 г.  
Дата выхода в свет 22.12.2023 г.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Усл. печ. л. 6,5.  
Бумага офсетная.  
Тираж 300 экз. Заказ 85.

Отпечатано на дупликаторе  
в типографии ОмГТУ.  
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ДИНАМИКА МЕХАНИЗМОВ И МАШИН**

**Д. А. Кечик**  
Оценка величины одновременно присутствующих угловой  
и параллельной расцентровок и дисбаланса роторов по сигналам  
вибрации .....2

**И. Ю. Лесняк, А. В. Паничкин, В. А. Урбанский**  
Математическое моделирование процесса сушки зерна пшеницы  
при акустико-вакуумном воздействии .....10

**В. В. Михеев, В. Н. Кузнецов, И. С. Кузнецов**  
Механический генератор высоконаправленной периодической силы .....16

**С. С. Рудый, Д. П. Щербинин, А. В. Иванов**  
Об особенностях локализации ионов в линейной квадрупольной ловушке  
с запирающими электродами .....23

**А. Ю. Турыбрин, А. В. Бубнов**  
Оптимизация работы землеройной техники при вскрытии участка  
трубопровода .....29

**Д. П. Щербинин, С. С. Рудый, В. В. Рыбин, А. В. Иванов**  
Контролируемая бистабильность заряженных частиц  
в поверхностных ионных ловушках .....37

**ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
И КОМПЛЕКСОВ**

**Е. Г. Андреева, Ю. А. Кладько**  
Исследование влияющих факторов на электропотребление  
домохозяйств .....44

**Б. А. Косарев, Г. А. Кошук, А. А. Охотников**  
Использование в электротехнической системе предприятия связи  
возобновляемого источника энергии для сглаживания профиля  
мощности .....49

**О. В. Стукач, П. А. Зорин, Н. Г. Федоров**  
Результаты энергосберегающего регулирования тепловой энергии  
на примере Томска и Буденновска .....53

**А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, Н. В. Захарова**  
Экспериментальное исследование и расчет характеристик  
магнитоэлектрического синхронного генератора на базе  
асинхронной машины .....57

**А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, Н. В. Захарова**  
Использование частотного способа регулирования оборотов  
асинхронного двигателя в качестве имитатора ветроколеса  
ветроэнергетической установки .....63

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
И ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**А. П. Афанасьев, С. С. Колмогорова**  
Использование системного анализа для оптимизации обработки больших  
данных .....69

**Ю. Н. Захаров, А. И. Зимин**  
Об устойчивости чебышевского итерационного метода .....73

**М. И. Кано**  
Отслеживание неровностей дорог при помощи Android-смартфона .....81

**Д. В. Постников, Э. А. Ткаченко, А. А. Теплоухов**  
Моделирование напряженного состояния при склерометрии цирконевых  
магнетронных покрытий .....85

**И. В. Ревина, Е. Н. Трифонова**  
Разработка оптимизационной имитационной модели производственного  
процесса .....91

## ДИНАМИКА МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

УДК 621

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-2-9

### ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОДНОВРЕМЕННО ПРИСУТСТВУЮЩИХ УГЛОВОЙ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАСЦЕНТРОВОК И ДИСБАЛАНСА РОТОРОВ ПО СИГНАЛАМ ВИБРАЦИИ

### ESTIMATION OF SIMULTANIOUS ANGLE AND PARALLEL MISALIGNMENT AND IMBALANCE OF SHAFTS RELYING ON VIBRATIONAL SIGNALS

Д. А. Кечик

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь*

D. A. Kechik

*Belarussian state university of informatics and radioelectronics, Minsk, Belarus*

**Аннотация.** Одна из важных задач неразрушающего контроля роторных механизмов – определение степени расцентровки валов. В настоящее время расцентровку обнаруживают, основываясь на анализе амплитудного спектра вибрации. Из экспериментальных данных видно, что амплитуды составляющих вибрации зависят от смещения валов по закону, близкому к линейному, но с разными коэффициентами пропорциональности. Коэффициенты зависят от конструкции муфты, и, как правило, неизвестны. В известных работах вибрация расцентрованных валов моделируется, как правило, введением в систему сил на разных частотах равной амплитуды. Это не согласуется с наблюдательными данными,

в частности с различной зависимостью амплитуд составляющих от величины расцентровки. К тому же, в системе обычно присутствует несколько источников сил. В частности, параллельная и угловая расцентровки могут быть выражены одновременно и создавать колебания на трёх гармониках частоты вращения ротора. Дисбаланс ротора приводит к появлению колебаний на частоте его вращения. Суммировать колебания можно только векторно, т.е. с учётом фазы. Без учёта фаз составляющих вибрации, сделать верный вывод о величинах присутствующих дефектов невозможно. В настоящей работе предложен способ расчёта величины параллельной расцентровки валов и дисбаланса одного из них.

**Ключевые слова:** вибрационная диагностика, расцентровка валов, дисбаланс ротора, динамика ротора.

**Abstract.** One of the important tasks of non-destructive testing of rotary mechanisms is to determine the degree of shaft misalignment. Currently, the misalignment is detected based on the analysis of the amplitude spectrum of vibration. Experimental data show that the amplitudes of the vibration components depend on the displacement of the shafts according to a law close to linear, but with different coefficients of proportionality. The coefficients depend on the design of the coupling, and are usually unknown. In well-known works, the vibration of centered shafts is modeled as a rule by introducing forces into the system at different frequencies of equal amplitude. This does not agree with the observational data, in particular with the different dependence of the amplitudes of the components on the magnitude of the misalignment. In addition, there are usually several sources of forces in the system. In particular, parallel and angular misalignment can be expressed simultaneously and create oscillations at three harmonics of the rotor speed. The imbalance of the rotor leads to the appearance of oscillations at the frequency of its rotation. The oscillations can only be summed vector-wise, i.e. taking into account the phase. Without taking into account the phases of the vibration components, it is impossible to make a correct conclusion about the magnitude of the defects present. In this paper, a method is proposed for calculating the magnitude of the parallel alignment of the shafts and the imbalance of one of them.

**Keywords:** vibrational diagnosing, shaft misalignment, rotor imbalance, rotor dynamics.

I. ВВЕДЕНИЕ

1. Диагностика расцентровки и дисбаланса валов

Неразрушающий контроль технического состояния оборудования помогает существенно снизить издержки от простоя и неожиданных поломок агрегатов. Это возможно благодаря своевременному обнаружению начала развития неисправности. Известно, что во многих случаях износ оборудования значительно ускоряется вследствие наличия в нём первичных дефектов, приводящих к повышению нагрузок и вибраций. К таким дефектам относятся дисбаланс и расцентровка валов. Расцентровка бывает двух видов: параллельная и угловая и возникает при соединении двух агрегатов, например, электродвигателя и насоса. Кинематические модели валов, соединённых муфтами, для обоих случаев, приведённые в [1], изображены на рис. 1.

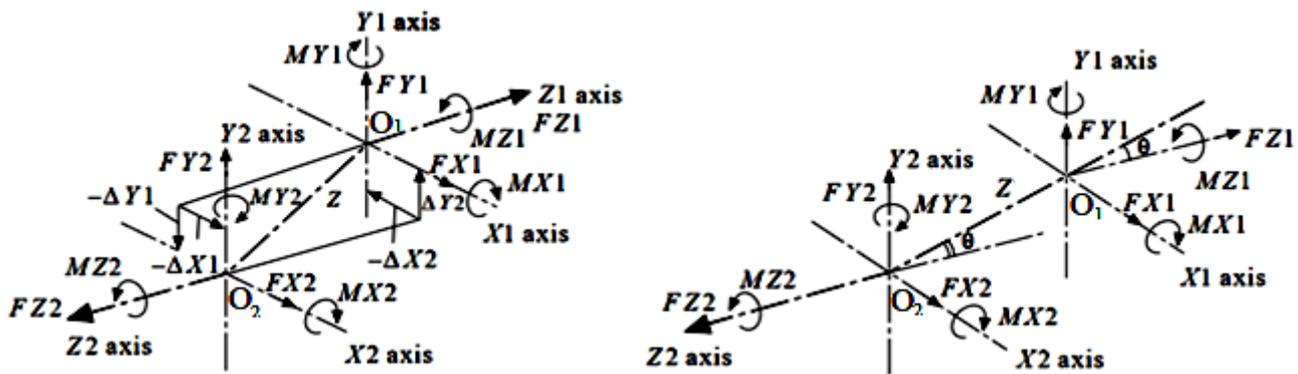


Рис. 1. Параллельная (а) и угловая (б) расцентровки валов

2. Связь вибрации и действующих в системе сил

Для измерения непосредственно доступны перемещение, скорость и ускорение на поверхности, где установлен датчик вибрации. Поскольку ускорение и скорость связаны однозначно с перемещением, будем считать, что измеряется перемещение. Чтобы понять, как вибрация, создаваемая объектом диагностики, связана с наличием и величиной неисправности, объект представляют как колебательную систему, состоящую из нескольких упругих элементов и демпферов. Перемещения точек на концах валов  $\delta$ , а также их первая и вторая производные (соответственно скорость и ускорение) связаны с действующими в системе силами дифференциальными уравнениями вида:

$$F(t) = m \cdot \delta'' + c \cdot \delta' + s \cdot \delta. \tag{1}$$

В уравнение (1) непосредственно не входят величины, связанные с величиной расцентровки или дисбаланса. Указанные неисправности создают в системе гармонические силы, которые и вызывают вибрацию на тех же частотах. Тогда необходимо определить зависимости сил от величин дефектов, которыми они создаются.

3. Зависимость действующих в системе сил от величины дефектов

Силы, создаваемые дисбалансом ротора, определяются как сосредоточенной массой, вызвавшей дисбаланс  $m_{imb}$ , так и её расстоянием до оси вращения  $e$ . Целесообразно измерять дисбаланс величиной эксцентриситета  $E$ :

$$F_{imb} = m_{imb} e \cdot \omega^2 = E \cdot \omega^2. \tag{2}$$

Здесь и далее  $\omega = 2\pi \cdot f_{tot}$  – угловая скорость вращения вала,  $f_{tot}$  – частота вращения (оборотная частота) вала.

Зависимость силы, создаваемой параллельной расцентровкой валов, от её величины рассчитывается для двух типов муфт в работе [2]. Величина расцентровки характеризуется расстоянием между параллельными осями вращения валов. Смещение валов порождает крутящие моменты на конце валов 1 и 2 относительно радиальных осей X ( $MX_1, MX_2$ ) и Y ( $MY_1, MY_2$ ) соответственно. Выражения для расчёта моментов различны для разных типов муфт.

Приведём выражения для гибкой муфты:

$$\begin{aligned} MX_1 &= Tq \sin \Psi_1 + Kb \Phi_1, \\ MX_2 &= Tq \sin \Psi_2 - Kb \Phi_2, \\ MY_1 &= Tq \sin \Phi_1 - Kb \Psi_1, \\ MY_2 &= Tq \sin \Phi_2 - Kb \Psi_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Tq$  – прикладываемый извне крутящий момент,  $Kb$  – вращательная жёсткость муфты, кг·м/рад. Отрезок  $O_1O_2$ , соединяющий точки, лежащие на оси валов на их концах, образует с их осями вращения углы  $\Phi_{1,2}$  и  $\Psi_{1,2}$ :

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \arcsin_{\Delta} Y_1 / Z; \Psi_1 = \arcsin_{\Delta} X_1 / Z, \\ \Phi_2 &= \arcsin_{\Delta} Y_2 / Z = -\Phi_1; \Psi_2 = \arcsin_{\Delta} X_2 / Z = -\Psi_1, \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $_{\Delta}X_1, _{\Delta}Y_1, Z$  – проекции вектора  $O_2O_1$  на оси X, Y, Z соответственно. Радиальные силы на концах обоих валов рассчитываются из величины моментов вокруг перпендикулярной оси к выбранному направлению:

$$\begin{aligned} F_{x,\parallel} &= (-MY_1 - MY_2) / Z = 2Kb \arcsin_{\Delta} (X_1 / Z) / Z, \\ F_{y,\parallel} &= (MX_1 + MX_2) / Z = 2Kb \arcsin_{\Delta} (Y_1 / Z) / Z. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогичным способом, предложенным в [1], рассчитываются моменты и силы, возникающие при угловой расцентровке:

$$\begin{aligned} F_{x,\angle} &= Tq \sin(\theta_x) / Z, \\ F'_{y,\angle} &= Kb \cdot \theta_x / Z, \\ F_{y,\angle} &= Tq \sin(\theta_y) / Z, \\ F'_{x,\angle} &= Kb \cdot \theta_y / Z. \end{aligned} \quad (6)$$

При наличии угловой расцентровки в одном из направлений силы возникают в обоих радиальных направлениях. Здесь  $\theta_i$  – угол отклонения второго вала в  $i$ -м направлении. Штрих означает, что данная сила возникла в результате отклонения вала в другом направлении.

Наличие колебаний, по крайней мере, на трёх частотах при угловой и параллельной расцентровке наблюдается в большинстве случаев. Возникновение второй гармоники оборотной частоты хорошо объясняет приведённая в работе [3] модель. Возникновение гармонических сил на иных частотах (первой, третьей, в ряде случаев и более высоких гармониках оборотной частоты) не находит строгого теоретического объяснения. Обычно при моделировании вибрации расцентрованных валов вводят априори гармонические силы равных амплитуд на трёх или четырёх частотах. Предлагаемые в литературе модели не могут быть использованы в случае наличия нескольких дефектов одновременно.

Исходя из вышесказанного, в настоящей работе разработана теоретическая модель, которая связывает амплитуды и фазы составляющих вибрации с величинами одновременно присутствующих параллельной, угловой расцентровок и дисбаланса. Модель также учитывает возможные различные амплитуды сил, возникающих на разных частотах.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основная масса работ посвящена обнаружению и оценке величины одиночного дефекта: параллельной или угловой расцентровки, дисбаланса. Оценки основаны на амплитудах составляющих вибрации на соответствующих частотах. Например, из амплитуды оборотной частоты рассчитывают величину дисбаланса. Амплитуды главным образом второй и третьей гармоники оборотной частоты используются для оценки величины расцентровки. Однако, при наличии нескольких дефектов одновременно, амплитуда колебаний ротора на каждой частоте не равна сумме амплитуд возбуждаемых колебаний на тех же частотах. Например, в работе [4] приведён пример зависимости амплитуд колебаний ротора от сдвига фаз сил, создаваемых дисбалансом и расцентровкой валов. Таким образом, при моделировании системы, в которой могут присутствовать несколько источников сил на одних частотах, необходимо учитывать амплитуды и фазы составляющих вибрации.

Пусть коэффициенты жёсткости и затухания известны. Измеряются перемещения точек на конце валов в различных направлениях. Частота вращения вала измеряется или известна и не меняется во время проведения измерений. Амплитуды и фазы составляющих вибрации могут быть оценены как амплитуды и фазы соответствующих составляющих комплексного спектра вибрации. Неизвестными остаются действующие в системе в различных направлениях силы. Создаваемые каждым источником колебаний силы зависят от искомых величин соответствующих дефектов: углового и параллельного смещения валов в обоих направлениях, массы дисбаланса. Следовательно, нужно выработать модель колебательной системы, связывающую комплексные амплитуды перемещения на гармониках оборотной частоты и величины сил. Основываясь на данной модели, можно найти величины сил, создаваемых в результате обоих расцентровок и дисбаланса.

Различная скорость роста амплитуд гармоник вала с увеличением расцентровки не находит объяснения в литературе. Экспериментальные зависимости амплитуды колебаний от величины расцентровки близки к линейным на значительном диапазоне величин. Поэтому для удобства представим силы на разных частотах как линейные функции величины расцентровки. Поскольку отклик системы зависит от частоты, можно предположить, что коэффициент роста определяется различным откликом на воздействия на разных частотах. Только ли этим определяется различная скорость роста амплитуд колебаний, возможно проверить, основываясь на доступных экспериментальных данных.

## III. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ

### 1. Система уравнений

Перемещение точек на концах валов описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \cdot \ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\delta}, \mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_n], \boldsymbol{\delta} = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n]^T, \quad (7)$$

где  $\mathbf{M}$  – матрица масс,  $\mathbf{C}$  – матрица затухания,  $\mathbf{S}$  – матрица жёсткости, размерности матриц  $n \cdot n$ ,  $n$  – число степеней свободы,  $\boldsymbol{\delta}$  – вектор перемещений оси вала  $\delta_i$  по  $i$ -м степеням свободы,  $\mathbf{F}$  – вектор вынуждающих сил,  $i = 1 \dots n$ , штрих означает производную по времени.

В работе [1] возмущающие силы и вызванные ими перемещения моделируются с учётом синфазной и квадратурной составляющих, которые записываются как:

$$\delta_i = X_{S_i} \cdot \cos(\omega t) + \delta_{C_i} \cdot \sin(\omega t), F_i = F_{S_i} \cdot \cos(\omega t) + F_{C_i} \cdot \sin(\omega t), \quad (8)$$

где  $\delta_{S_i}, \delta_{C_i}$  и  $F_{S_i}, F_{C_i}$  – амплитуды синфазной и квадратурной составляющих. Выражение (7) можно преобразовать с учётом (8) в систему линейных алгебраических уравнений, связывающую комплексные амплитуды сил и перемещений:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{F}} &= -\omega^2 M \cdot \dot{\delta} - i\omega \cdot C \cdot \dot{\delta} + S \cdot \dot{\delta}, \\ \dot{\delta}_i &= \delta_i e^{(j\phi_{\delta_i})}, \delta_i^2 = \delta_{S_i}^2 + \delta_{C_i}^2, \operatorname{tg}\phi_{\delta_i} = \delta_{C_i} / \delta_{S_i}, \\ \dot{F}_i &= F_i e^{(j\phi_{F_i})}, F_i^2 = F_{S_i}^2 + F_{C_i}^2, \operatorname{tg}\phi_{F_i} = F_{C_i} / F_{S_i},\end{aligned}\tag{9}$$

где точка над переменной означает комплексное число. Модуль этой же величины записывается без точки. После приведения подобных получим:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{F}} &= \mathbf{K}(f) \cdot \dot{\delta} \\ k_{im}(f) &= -\omega^2 \cdot m_{im} + j \cdot \omega d_{im} + s_{im} = R_{im} + j \cdot I_{im}, i, m = 1 \dots n.\end{aligned}\tag{10}$$

Согласно [5], существуют 12 степеней свободы для системы из двух соединяемых валов, включающие поступательные вдоль осей X, Y, Z и вращательные вокруг них для первого и второго валов:

$$\dot{\delta} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2]^T.\tag{11}$$

Здесь индекс 1 означает ведущий вал, индекс 2 – ведомый. Поскольку

$$x_1 = -x_2, y_1 = -y_2, z_1 = -z_2, \theta_1 = -\theta_2, \beta_1 = -\beta_2, \gamma_1 = -\gamma_2,\tag{12}$$

целесообразно рассматривать перемещения только одного вала. К тому же в модели, принятой в [5], степени свободы  $x_1, y_1$  зависимы только друг от друга, остальные – независимы от всех других. Вследствие вышесказанного, с целью упрощения анализа возможно ограничить число степеней свободы  $n$  и число уравнений в системе (10) двумя, оставив уравнения движения конца первого вала по осям  $x$  и  $y$ . Тогда можно записать  $\dot{\delta} = [\dot{x}, \dot{y}]^T$ , опустив индекс 1.

В силу линейности выражения (10), при наличии нескольких вынуждающих сил, реакция системы на каждое воздействие не зависит от величины других воздействий, а отклик на все воздействия равен сумме откликов на каждое из них. Запишем систему уравнений при наличии нескольких источников воздействия, создающих колебания на нескольких частотах:

$$\begin{aligned}\mathbf{K}(f) \dot{\mathbf{q}}_{i,1,1} &= \dot{\mathbf{F}}_{i,1,1}(E_1), \\ \mathbf{K}(2f) \dot{\mathbf{q}}_{i,2,1} &= \dot{\mathbf{F}}_{i,2,1}(E_1), \\ \dots & \\ \mathbf{K}(Mf) \dot{\mathbf{q}}_{i,L,1} &= \dot{\mathbf{F}}_{i,L,1}(E_1), \\ \mathbf{K}(Mf) \dot{\mathbf{q}}_{i,L,2} &= \dot{\mathbf{F}}_{i,L,2}(E_2), \\ \dots & \\ \mathbf{K}(Mf) \dot{\mathbf{q}}_{i,L,N} &= \dot{\mathbf{F}}_{i,L,N}(E_N),\end{aligned}\tag{13}$$

где  $n = 1 \dots N$  – индекс по номеру дефекта,  $l = 1 \dots L$  – индекс по номеру гармоники,  $i = 1 \dots I$  – индекс по номеру направления.

Доступны для измерения амплитуды суммарных гармонических перемещений, вызванных несколькими силами, действующими на одной частоте. Поэтому целесообразно сложить уравнения системы, описывающие колебания на одних частотах, вызванные различными силами:

$$\begin{aligned}
 \dot{k}_{11}(f)(\dot{x}_{1,\parallel} + \dot{x}_{1,\perp} + \dot{x}_{1,imb}) + \dot{k}_{12}(f)(\dot{y}_{1,\parallel} + \dot{y}_{1,\perp} + \dot{y}_{1,imb}) &= \sum_{n=1}^N \dot{F}_{x,n,1}(E_n), \\
 \dot{k}_{11}(2f)(\dot{x}_{2,\parallel} + \dot{x}_{2,\perp}) + \dot{k}_{12}(2f)(\dot{y}_{2,\parallel} + \dot{y}_{2,\perp}) &= \sum_{n=1}^N \dot{F}_{x,n,2}(E_n), \\
 \dots & \\
 \dot{k}_{11}(Lf)(\dot{x}_{M,\parallel} + \dot{x}_{M,\perp}) + \dot{k}_{12}(Lf)(\dot{y}_{M,\parallel} + \dot{y}_{M,\perp}) &= \sum_{n=1}^N \dot{F}_{x,n,M}(E_n), \\
 \dot{k}_{21}(f)(\dot{x}_{1,\parallel} + \dot{x}_{1,\perp} + \dot{x}_{1,imb}) + \dot{k}_{22}(f)(\dot{y}_{1,\parallel} + \dot{y}_{1,\perp} + \dot{y}_{1,imb}) &= \sum_{n=1}^N \dot{F}_{y,n,1}(E_n), \\
 \dot{k}_{21}(2f)(\dot{x}_{2,\parallel} + \dot{x}_{2,\perp}) + \dot{k}_{22}(2f)(\dot{y}_{2,\parallel} + \dot{y}_{2,\perp}) &= \sum_{n=1}^N \dot{F}_{y,n,2}(E_n), \\
 \dots & \\
 \dot{k}_{21}(Lf)(\dot{x}_{L,\parallel} + \dot{x}_{L,\perp}) + \dot{k}_{22}(Lf)(\dot{y}_{L,\parallel} + \dot{y}_{L,\perp}) &= \sum_{n=1}^N \dot{F}_{y,n,L}(E_n).
 \end{aligned} \tag{14}$$

2. Моделирование действующих в системе сил

Амплитуды составляющих вибрации зависят от величины расцентровки неодинаково. В частности, множество авторов на основании экспериментальных данных делают выводы, что амплитуда первой гармоники зависит гораздо слабее от величины смещения, чем амплитуда второй [1, 6]. Экспериментальные зависимости амплитуд составляющих вибрации от смещения также отражают различные коэффициенты пропорциональности амплитуды величине смещения. Наблюдаемые различия можно объяснить наличием зависимых от частоты коэффициентов в левой части уравнений системы (14). Для простоты анализа представим зависимость амплитуды вибрации от величины смещения валов как  $x = F_x / (s_{22} - m\omega^2)$ . Тогда коэффициент пропорциональности  $k(\omega) = 1 / (s_{22} - m\omega^2)$ . Альтернативная гипотеза – амплитуды сил, возникающих в результате расцентровки на разных частотах, пропорциональны функциям смещения валов с различными коэффициентами пропорциональности  $k_l$ :  $x_l = k_l F_x$ ,  $k_l = c_l k(\omega)$ , где  $c_l$  – константы, различные для каждой гармоники.

При малых смещениях валов, на основании (5) и (6), можно предположить, что  $F_x \approx E$ ,  $x_{l,v} \approx E v / (s_{22} - l m \omega^2)$ ,  $v = 1, 2$  – индекс одной из двух выбранных величин расцентровки. При значениях оборотной частоты, далёких от критической, можно записать  $k(\omega) \approx 1/s_{22}$ . При этом  $k_1 = (x_{1,1} - x_{1,2}) / (E_2 - E_1)$  и  $k_2 = (x_{2,1} - x_{2,2}) / (E_2 - E_1)$ . При условии справедливости нулевой гипотезы,  $k_1 = k_2$ . В противном случае, нулевая гипотеза отвергается. В таблице 1 приведены значения амплитуд составляющих вибрации при различных смещениях валов. Значения взяты из работы [1] и рассчитаны по доступным сигналам вибрации [7]. Частоты рассматриваемых составляющих вибрации не попадали в резонансные области. Зависимости амплитуд от  $E$ , приведённые на рисунке 2, можно считать линейными.

ТАБЛИЦА 1  
ЗАВИСИМОСТИ АМПЛИТУД СОСТАВЛЯЮЩИХ ВИБРАЦИИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФЕКТА

Источник	Тип расцентровки	$f_0$ , Гц	$E_1$ , мм	$E_2$ , мм	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	$k_1$	$k_2$
[1]	Угловая	30	1	2	1.38	2.1	4.57	8.14	0.72	3.57
[1]	Угловая	47	1	2	1.05	1.17	3.6	7.71	0.12	4.12
[1]	Параллельная	30	1	2	3.87	6.85	9.54	18.49	2.98	8.95
[1]	Параллельная	47	1	2	1.03	1.13	10.75	20.64	0.1	9.88
[7]	Параллельная	22	1	2	0.18	0.17	0.016	0.042	-0.008	0.016
[7]	Параллельная	32	1	2	0.014	0.017	0.013	0.011	0.0031	-0.027
[7]	Параллельная	56	1	2	0.202	0.199	0.02	0.05	-0.038	0.03

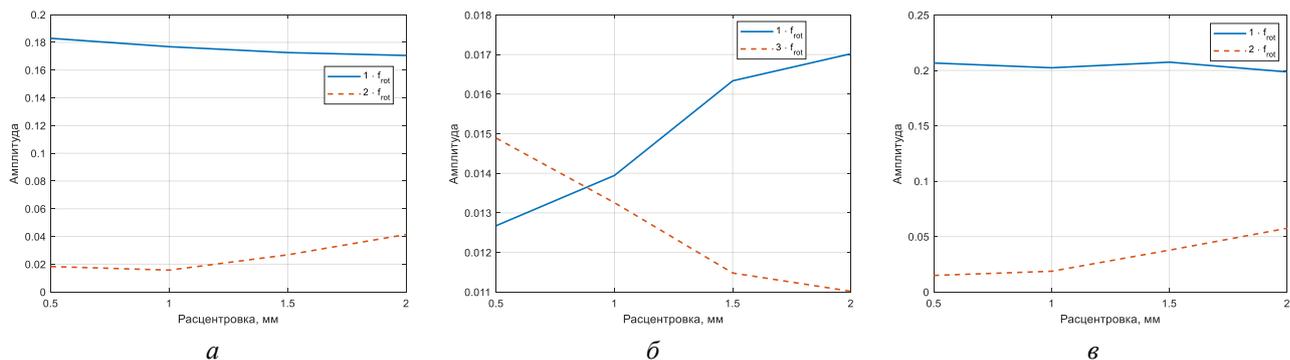


Рис. 2. Зависимости  $x_1(E)$ ,  $x_2(E)$  для угловой и параллельной расцентровок, построенные по данным из [7] при  $f_0 = 22$  Гц (а),  $f_0 = 32$  Гц (б),  $f_0 = 56$  Гц (в)

Проверка нулевой гипотезы статистическими методами требует большего объёма выборки, поэтому оставлена за пределами данной работы. Поскольку величина  $|k_1 - k_2|$  сравнима или превышает  $k_1$  и  $k_2$ , предположим, что амплитуды гармонических сил, создаваемых расцентровкой валов, зависят линейно от величины расцентровки с коэффициентами, различными для разных частот. Тогда силы, вызванные параллельной, угловой расцентровками, дисбалансом могут быть представлены, соответственно, как

$$\begin{aligned} \dot{F}_{i,l,1} &= a_l \dot{F}_{i,\parallel}, \\ \dot{F}_{i,l,2} &= b_l \dot{F}_{i,\angle,t} = b_l (\dot{F}_{i,\angle} + \dot{F}'_{i,\angle}), \\ \dot{F}_{i,l,3} &= \dot{F}_{i,imb}. \end{aligned} \tag{15}$$

Коэффициенты  $a_l$ ,  $b_l$  отражают различные линейные зависимости сил на разных частотах от величины дефекта,  $l = [1, 2, 3]$  – индекс гармоники,  $i = [1, 3]$ . Индекс  $t$  означает суммарную амплитуду составляющих силы в  $i$ -м направлении, вызванных угловой расцентровкой в  $i$ -м и ортогональном ему направлениях согласно (6).

Пусть для настоящего типа муфты рассчитаны или получены экспериментально коэффициенты  $a_l$ ,  $b_l$ . Предположим, что в системе возбуждаются вследствие параллельной и угловой расцентровок силы на трёх гармониках оборотной частоты. Запишем тогда систему уравнений, описывающую колебания в двух направлениях на трёх частотах. Тогда получим СЛАУ, число уравнений которой позволяет найти комплексные амплитуды сил:

$$\begin{cases} \dot{C}_{1x} = a_1 \dot{F}_{x,\parallel} + b_1 \dot{F}_{x,\angle,t} + \dot{F}_{x,imb} \\ \dot{C}_{2x} = a_2 \dot{F}_{x,\parallel} + b_2 \dot{F}_{x,\angle,t} \\ \dot{C}_{3x} = a_3 \dot{F}_{x,\parallel} + b_3 \dot{F}_{x,\angle,t} \\ \dot{C}_{1y} = a_2 \dot{F}_{y,\parallel} + b_2 \dot{F}_{y,\angle,t} + \dot{F}_{y,imb} \\ \dot{C}_{2y} = a_2 \dot{F}_{y,\parallel} + b_2 \dot{F}_{y,\angle,t} \end{cases} \tag{16}$$

Константы  $\dot{C}_{l,x} = k_{11}(l \cdot f) \dot{x}_l + k_{12}(l \cdot f) \dot{y}_l$ ,  $\dot{C}_{l,y} = k_{21}(l \cdot f) \dot{x}_l + k_{22}(l \cdot f) \dot{y}_l$  отражают известные левые части. Аналитически решить относительно неизвестных амплитуд сил систему (15) можно методом Гаусса.

### 3. Оценка величины дефекта по комплексным амплитудам сил

Рассчитать величину параллельной расцентровки в каждом из направлений можно исходя из выражений (3)–(5):

$$D_i = \sin(F_{i,\parallel} Z / (2Kb)) \cdot Z, \quad (17)$$

где  $D_i = [\Delta X, \Delta Y]$ . Согласно (6) и (15), амплитуда сил, вызванных угловой расцентровкой в каждом направлении, складывается из двух составляющих. Тогда для расчёта величины угловой расцентровки нужно решить систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{F}_{x,\angle,t} &= \dot{F}_{x,\angle} + \dot{F}'_{y,\angle} = Tq \sin(\theta_x) / Z + Kb \cdot \theta_y / Z \approx Tq \cdot \theta_x / Z + Kb \cdot \theta_y / Z, \\ \dot{F}_{y,\angle,t} &= \dot{F}_{y,\angle} + \dot{F}'_{x,\angle} = Tq \sin(\theta_y) / Z + Kb \cdot \theta_x / Z \approx Tq \cdot \theta_y / Z + Kb \cdot \theta_x / Z. \end{aligned} \quad (18)$$

Эксцентриситет ротора находится как

$$E = F_{imb} / \omega^2. \quad (19)$$

#### IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлен способ расчёта величины нескольких одновременно присутствующих дефектов вала по сигналам его вибрации. На основании комплексных амплитуд гармонических составляющих вибрации рассчитываются амплитуды одновременно действующих в системе сил, возбуждаемых угловой и параллельной расцентровкой валов и дисбалансом ротора. Полученные амплитуды используются для расчёта величины угловой и параллельной расцентровки вдоль каждого направления и величины дисбаланса. Полученная информация используется для оценки опасности каждого дефекта и планирования его устранения. Таким образом, возможно минимизировать износ оборудования вследствие повышенных нагрузок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sekhar A. S. Prabhu B. S. Effects of coupling misalignment on vibrations of rotating machinery // *Journal of Sound and Vibration*. 1995. Vol. 185, no. 4. P. 655–671. DOI: 10.1006/jsvi.1995.0407.
2. Gibbons C. B. Coupling Misalignment Forces // *Proceedings of the Fifth Turbomachinery Symposium / Gas Turbine Laboratories, Texas A&M University, College Station, Texas*. 1976. P. 111–116.
3. Haifei W., Gong J. Dynamic analysis of coupling misalignment and unbalance coupled faults // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2019. Vol. 38. P. 363–376. DOI: 10.1177/1461348418821582.
4. Saavedra P. N., Ramírez D. E. Vibration analysis of rotors for the identification of shaft misalignment. Part 2: Experimental validation // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C // Journal of Mechanical Engineering Science*. 2004. Vol. 218, no. 9. P. 987–999. DOI:10.1243/0954406041991198.
5. Desouki M., Sassi S., Renno J. [et al.] Dynamic Response of a Rotating Assembly under the Coupled Effects of Misalignment and Imbalance // *Shock and Vibration*. 2020. Vol. 2020. P. 1–26. DOI: 10.1155/2020/8819676.
6. Lu X., Zhang J., Ma L. [et al.] Effects of misalignment on the nonlinear dynamics of a two-shaft rotor-bearing-gear coupling system with rub-impact fault // *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19, no. 8. P. 5960–5977. DOI: 10.21595/jve.2017.18476.
7. MAFAULDA: Machinery Fault Database. URL: [http://www02.smt.ufrj.br/~offshore/mfs/page\\_-01.html#SEC2](http://www02.smt.ufrj.br/~offshore/mfs/page_-01.html#SEC2) (date accessed: 08.09.2022).

УДК 664.723

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-10-15

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ ПРИ АКУСТИКО-ВАКУУМНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

### MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF DRYING WHEAT GRAIN UNDER ACOUSTIC-VACUUM EXPOSURE

И. Ю. Лесняк<sup>1</sup>, А. В. Паничкин<sup>2</sup>, В. А. Урбанский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

I. Y. Lesnyak<sup>1</sup>, A. V. Panichkin<sup>2</sup>, V. A. Urbansky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of mathematics named after S.L. Soboleva Siberian branch of the Russian academy of sciences, Novosibirsk, Russia

**Аннотация.** Для исследования процесса сушки зерна пшеницы в условиях комбинированного акустико-вакуумного воздействия разработана математическая модель рассматриваемого процесса на основе дифференциальных уравнений. Проведены предварительные численные эксперименты с использованием разработанной математической модели. Получены результаты математического моделирования в виде зависимостей изменения массы, температуры и влажности зерна пшеницы как при отдельном акустическом и вакуумном воздействиях, так и при комбинированном акустико-вакуумном воздействии. Определена скорость сушки зерна пшеницы, которая составляет при акустическом воздействии 0.01 г/мин, вакуумном воздействии 0.19 г/мин и акустико-вакуумном воздействии 0.28 г/мин.

**Ключевые слова:** зерно пшеницы, математическая модель, акустико-вакуумное воздействие, тепло- и массообмен.

**Abstract.** To investigate the process of drying wheat grain under conditions of combined acoustic-vacuum exposure, a mathematical model of the process under consideration was developed based on differential equations. Preliminary numerical experiments were carried out using the developed mathematical model. The results of mathematical modeling were obtained in the form of dependencies of changes in mass, temperature and humidity of wheat grain both under separate acoustic and vacuum exposure, and under combined acoustic-vacuum exposure. The drying rate of wheat grain was determined, which is 0.01 g/min under acoustic exposure, 0.19 g/min under vacuum exposure and 0.28 g/min under acoustic-vacuum exposure.

**Keywords:** wheat grain, mathematical model, acoustic-vacuum exposure, heat and mass transfer.

#### I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существующие способы сушки зерна пшеницы наиболее эффективны при их комбинированном воздействии [1]. Авторами предложен комбинированный способ сушки зерна пшеницы на основе акустико-вакуумного воздействия, который является новым и еще не исследованным.

Одним из этапов научных исследований является создание математической модели рассматриваемого процесса. Проведен поиск математических моделей процесса сушки зерна пшеницы, который показал, что существует ограниченное количество математических моделей, описывающих процесс тепло- и массообмена при сушки зерна пшеницы. При этом математических моделей, учитывающих акустико-вакуумное воздействие, найдено не было. Например, в работе [2] разработаны регрессионные математические модели второго порядка для процесса конвективно-озоновоздушную сушки зерна с разной начальной влажностью (30, 25 и 20 %).

Математическая модель сушки зерна ячменя при совместном воздействии на нее инфракрасного излучения и вакуума предложена в работе [3]. Данная модель разработана на основе дифференциальных уравнений и метода неопределенных коэффициентов. Численная реализация разработанной модели показала преимущество в плане скорости влагосъема сушки зерна ячменя совместным воздействием на нее инфракрасного излучения и вакуума по сравнению с сушкой при атмосферном давлении. Полученные результаты еще раз подтверждают эффективность комбинированного способа сушки зерна.

В работе [4] разработана математическая модель тепло и - влагообмена в плотном движущемся слое зерна, учитывающая взаимное вертикальное перемещение слоёв при СВЧ – конвективной сушке. Результаты моделирования сушки зерна показали влияние колебания параметров зерна и поля СВЧ на процесс сушки. Однако данная математическая модель не учитывает испарение жидкости из пор зерна и термодинамическое взаимодействие парогазовой смеси в порах с окружающим воздухом.

В работе [5] получена математическая модель для пшеницы, связывающая время сушки с технологическими параметрами сушки: температурой теплоносителя, начальной температурой и начальной влажностью зерна. Анализ модели показал, что температура зерна в пределах варьирования факторов значимо не влияет на время сушки. Модель позволяет рассчитать время сушки по измеренной исходной влажности зерна и температуре теплоносителя.

Проведенный патентно-информационный обзор показал, что существующие математические модели описывают кинематику сушки зерна пшеницы при воздействии конвективных потоков газа, инфракрасного излучения и других факторов, не учитывающих влияние акустико-вакуумного воздействия на скорость сушки зерна пшеницы.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для определения скорости сушки зерна пшеницы при акустико-вакуумном воздействии необходимо выполнить следующие задачи:

- разработать математическую модель процесса сушки зерна пшеницы при акустико-вакуумном воздействии;
- провести численное моделирование;
- получить зависимости изменения массы, температуры и влажности зерна пшеницы от времени процесса сушки при заданных параметрах акустико-вакуумного воздействия.

## III. ТЕОРИЯ

Принципиальная схема экспериментальной ёмкости с акустическим излучателем, заполненной зерном и установленной в вакуумной камере показана на рис. 1.

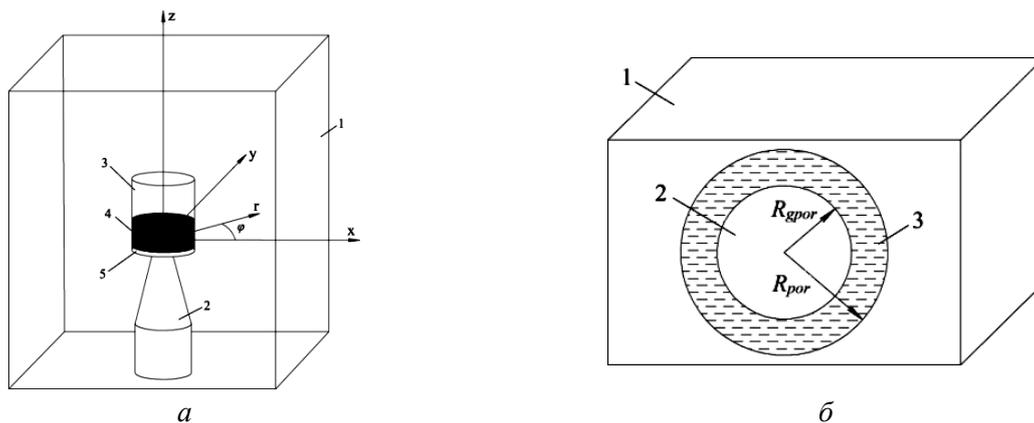


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной ёмкости с прямоугольной ( $x, y, z$ ) и полярной ( $r, \varphi$ ) системами координат

- а) 1 – вакуумная камера; 2 – акустический излучатель, жёстко связанный с дном экспериментальной ёмкости; 3 – цилиндрическая экспериментальная ёмкость; 4 – слой зерна в экспериментальной ёмкости; 5 – свободный объём между дном экспериментальной ёмкости и слоем зерна, возникающий в процесса акустического воздействия; б) 1 – фрагмент зерна с порой радиусом  $R_{por}$  в разрезе; 2 – область с парогазовой смесью внутри поры с радиусом  $R_{gpor}$ ; 3 – слой жидкости толщиной  $R_{por} - R_{gpor}$

Скорость испарения жидкости с единицы площади в поре зерна [6]:

$$W_l(t, T, P) = K_0 \left( P_l(T_l) - P_{ps}(m_{sp}, T_{sgmp}) \right) \left( \frac{P_0}{P_{por}} \right)^q, \quad (1)$$

где  $K_0$  – коэффициент состояния испаряемой поверхности жидкости;  $P_l$  – парциальное давление насыщения испаряемой жидкости;  $T_l$  – температура жидкости в поре;  $P_{ps}$  – парциальное давление паров жидкости в поре;  $m_{sp}$  – масса паров жидкости в поре;  $T_{sgmp}$  – температура парогазовой смеси в порах;  $P_0$  – начальное атмосферное давление;  $P_{por}$  – текущее давление в поре;  $q$  – степень пропорциональности изменению давления для данной жидкости [7].

Система обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающая обмен массами при вакуумном воздействии (при откачивании парогазовой смеси из вакуумной камеры  $C_U = 1$ , при выключенном вакуумном насосе  $C_U = 0$ ) и акустическом воздействии на жидкость в порах зерен (при включении акустического излучателя  $C_A = 1$ , при выключении акустического излучателя  $C_A = 0$ ), будет иметь вид:

$$\frac{dm_l}{dt} = -SW_l(t, T, P), \quad (2)$$

где  $m_l$  – масса жидкости в порах;  $S$  – площадь свободной поверхности жидкости в порах.

$$\frac{dm_{air}}{dt} = -C_U U_V \frac{m_{air}}{V_V} + U_{Vp} \left( \frac{m_{airp}}{V_p} - \frac{m_{air}}{V_V} \right), \quad (3)$$

где  $m_{air}$  – масса сухого воздуха в вакуумной камере;  $U_V$  – объемная скорость откачивания газов из вакуумной камеры;  $V_V$  – объём вакуумной камеры;  $U_{Vp}$  – массовая скорость истечения воздуха и паров жидкости из пор;  $m_{airp}$  – массы сухого воздуха в порах;  $V_p$  – объём парогазовой смеси в порах.

$$\frac{dm_s}{dt} = -C_U U_V \frac{m_s}{V_V} + U_{Vp} \left( \frac{m_{sp}}{V_p} - \frac{m_s}{V_V} \right), \quad (4)$$

где  $m_s$  – масса пара жидкости в вакуумной камере;  $m_{sp}$  – масса паров жидкости в порах.

$$\frac{dm_{airp}}{dt} = -U_{Vp} \left( \frac{m_{airp}}{V_p} - \frac{m_{air}}{V_V} \right), \quad (5)$$

$$\frac{dm_{sp}}{dt} = -U_{Vp} \left( \frac{m_{sp}}{V_p} - \frac{m_s}{V_V} \right) + SW_l(t, T, P), \quad (6)$$

$$U_{Vp} = - \frac{dm_l}{dt} \frac{kT_{sgmp}}{\mu_l P_{por}} + C_U \frac{dV_{Vp}}{dt} + C_A 8\pi A f S_l C_{por}, \quad (7)$$

где  $m_l$  – масса жидкости в порах зерна;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\mu_l$  – молярная масса жидкости;  $V_{Vp}$  – скорость снижения парогазовой смеси в порах массой  $m_{sgmp}$  при откачивании парогазовой смеси из вакуумной камеры со скоростью  $U_V$ ;  $A$  – амплитуда колебаний поверхности акустического излучателя и дна экспериментальной ёмкости;  $f$  – частота акустических колебаний;  $S_l$  – площадь боковой поверхности зерен;  $C_{por}$  – коэффициент взаимодействия зерен с парогазовой смесью в вакуумной камере.

Изменение температуры жидкости:

$$\frac{dT_l}{dt} = -S_l W_l(t, T, P) \frac{(L_l - C_{pl} T_l)}{m_l C_{pl}} \frac{dm_l}{dt} + C_A \frac{Q_A}{m_l C_{pl} + N_g m_{dg} C_{pg}}, \quad (8)$$

где  $L_l$  – коэффициент скрытой теплоты испарения;  $C_{pl}$  – теплоёмкость жидкости в порах зерна;  $Q_A$  – мощность акустического воздействия;  $N_g$  – количество зерен;  $m_{dg}$  – масса сухого зерна;  $C_{pg}$  – теплоёмкость зерна.

Изменение температуры парогазовой смеси в вакуумной камере:

$$\frac{dT_{sgm}}{dt} = - \frac{1}{k-1} \frac{T_{sgm}}{V_V} C_U U_V, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент адиабаты.

Изменение температуры парогазовой смеси в порах зерна:

$$\frac{dT_{sgmp}}{dt} = -\frac{1}{k-1} \frac{T_{sgmp}}{V_p} C_U U_{Vp} + \frac{(L_l - C_{pl}T_l)}{m_{airp}C_{p_{air}} + m_{sp}C_{ps}} S_l W_l(t, T, P), \quad (10)$$

где  $C_{\text{air}}$  – теплоёмкость сухого воздуха в вакуумной камере;  $C_{\text{ps}}$  – теплоёмкость паров жидкости в вакуумной камере.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С использованием созданной математической модели проведено численное моделирование процесса сушки зерна пшеницы при акустическом, вакуумном и акустико-вакуумном воздействии.

Исходные данные для проведения математического моделирования: начальная масса зерна пшеницы 65 г; плотность зерна пшеницы 1.3 г/см<sup>3</sup>; начальная влажность зерна пшеницы 18 – 23 %; влажность воздуха в окружающем пространстве 45%; температура воздуха в окружающем пространстве 22 °С; частота акустического воздействия 26 кГц; амплитуда акустического воздействия 10 мкм; давление в вакуумной камере 101.3 – 0.13 кПа; начальная температура зерна пшеницы 22 °С; объём экспериментальной ёмкости 155 см<sup>3</sup>; объём вакуумной камеры 0.5 м<sup>3</sup>; время акустико-вакуумного воздействия – 10 минут. Масса одного зерна принимается равной 0.03 г. При общей принятой массе всех зерен 65 г количество зерен составляет 2166 шт.

На рис. 2–5 показаны графики изменения массы, температуры и влажности зерна пшеницы при акустическом, вакуумном и акустико-вакуумном воздействии.

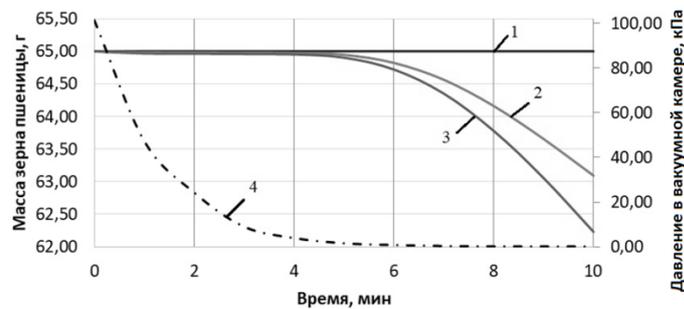


Рис. 2. Изменение массы зерна пшеницы:

- 1 – при акустическом воздействии (левая ось); 2 – при вакуумном воздействии (левая ось);
- 3 – при акустико-вакуумном воздействии (левая ось); 4 – давление в вакуумной камере (правая ось)

При акустическом воздействии масса зерна пшеницы практически не изменяется. При вакуумном воздействии масса пшеницы уменьшается на 1.9 г, при акустико-вакуумном воздействии – на 2.7 г. Уменьшение массы зерна пшеницы при всех видах воздействия на неё наблюдается с 5 минуты проведения эксперимента при давлении в вакуумной камере 1.5 кПа.

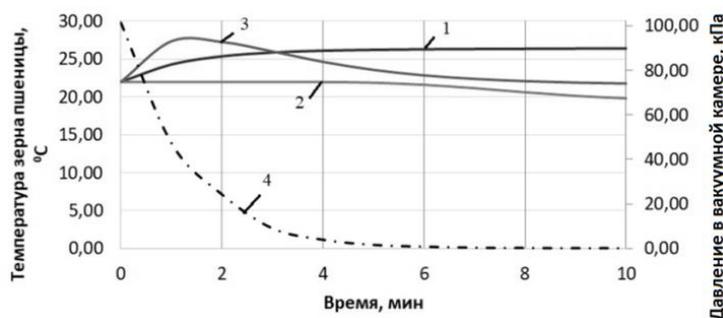


Рис. 3. Изменение температуры зерна пшеницы:

- 1 – при акустическом воздействии (левая ось); 2 – при вакуумном воздействии (левая ось);
- 3 – при акустико-вакуумном воздействии (левая ось); 4 – давление в вакуумной камере (правая ось)

При акустическом воздействии температура зерна пшеницы плавно увеличивается с начального момента времени до 4 минуты эксперимента на  $4^{\circ}\text{C}$ , а с 4 до 10 минуты практически не изменяется и находится в окрестности  $26^{\circ}\text{C}$ . Увеличение температуры зерна пшеницы при акустическом воздействии можно объяснить кондуктивным теплообменом зерна с поверхностью стенки экспериментальной ёмкости, которая нагревается от акустического излучателя. При вакуумном воздействии температура зерна пшеницы плавно уменьшается с  $22^{\circ}\text{C}$  до  $19,8^{\circ}\text{C}$  по причине уменьшения температуры в объеме вакуумной камеры при сбросе давления. При акустико-вакуумном воздействии температура зерна пшеницы с начального момента времени до 1,5 минуты эксперимента (давление в вакуумной камере 38 кПа) резко увеличивается на  $5^{\circ}\text{C}$  с последующим резким уменьшением до конца эксперимента на  $5,5^{\circ}\text{C}$ .

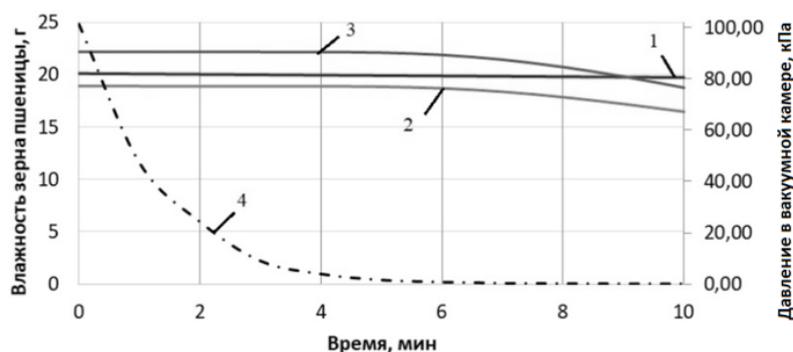


Рис. 4. Изменение влажности зерна пшеницы:

- 1 – при акустическом воздействии (левая ось); 2 – при вакуумном воздействии (левая ось);  
3 – при акустико-вакуумном воздействии (левая ось); 4 – давление в вакуумной камере (правая ось)

При акустическом воздействии влажность зерна практически не изменяется. При вакуумном и акустико-вакуумном воздействиях влажность зерна с начального момента времени до 4,5-5 минуты эксперимента также практически не изменяется. С 5 минуты эксперимента влажность зерна плавно уменьшается при вакуумном воздействии на 2,4%, при акустико-вакуумном воздействии – на 3,4 %.

На рис. 5 показано изменение скорости сушки зерна пшеницы.

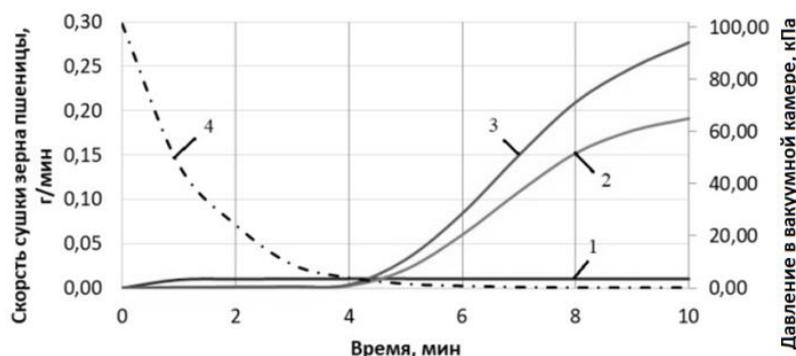


Рис. 5. Скорость сушки зерна пшеницы:

- 1 – при акустическом воздействии (левая ось); 2 – при вакуумном воздействии (левая ось);  
3 – при акустико-вакуумном воздействии (левая ось); 4 – давление в вакуумной камере (правая ось)

При акустическом воздействии скорость сушки зерна с начального момента времени до 1 минуты эксперимента незначительно увеличивается на 0,01 г/мин и до конца эксперимента остается постоянной. При вакуумном и акустико-вакуумном воздействиях скорость сушки зерна с начального момента времени до 4,5-5 минуты практически не изменяется. С 5 минуты (давление в вакуумной камере 1,6 кПа) до 10 минуты эксперимента скорость сушки зерна резко увеличивается при вакуумном воздействии до 0,19 г/мин, а при акустико-вакуумном воздействии до 0,28 г/мин, что соответствует графикам изменения влажности и массы зерна пшеницы.

## V. ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель процесса тепло- и массообмена при сушке зерна пшеницы в условиях акустико-вакуумного воздействия на основе дифференциальных уравнений.
2. С использованием разработанной математической модели проведено численное моделирование исследуемого процесса.
3. Получены зависимости изменения массы, температуры и влажности зерна пшеницы от времени процесса сушки при заданных параметрах акустико-вакуумного воздействия.
4. Определена скорость сушки зерна пшеницы, которая примерно составляет при акустическом воздействии – 0.01 г/мин, вакуумном воздействии – 0.19 г/мин и акустико-вакуумном воздействии – 0.28 г/мин.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20091, <https://rscf.ru/project/22-29-20091/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лесняк И. Ю., Урбанский В. А., Гавриленко С. В. Экспериментальные исследования процесса сушки зерна пшеницы при акустико-вакуумном воздействии // Ученые Омска - региону : материалы VII Регион. науч.-техн. конф. (Омск, 1–2 июня 2022 г.) / Ом. гос. техн. ун-т. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2022. С. 45–48. 1 CD-ROM.
2. Пахомов В. И., Газалов В. С., Буханцов К. Н. Регрессионная математическая модель двухэтапной комбинированной электротехнологии высокотемпературной конвективной сушки и озоновоздушной обработки зерна // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 1. С. 81–95. DOI: 10.31992/0321-4443-2019-1-81-95.
3. Масалимов И. Х., Каримов Х. Т., Павленко В. А. Математическая модель сушки зерна ячменя инфракрасным нагревом в вакууме // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 3 (32). С. 95–101.
4. Васильев А. Н., Васильев А. А., Цымбал А. А. Моделирование СВЧ-конвективной сушки зерна при движении его в активной зоне // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 3 (32). С. 319–329.
5. Захахатнов В. Г. Моделирование процесса сушки зерна в неподвижном слое // АПК России. 2021. Т. 28, № 2. С. 217–221.
6. Trushlyakov V. I., Panichkin A. V., Lesnyak I. Y. [et al.] Theoretical and experimental investigations on dynamics of liquid evaporation process in closed volume under acoustic-vacuum exposure // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 162. P. 120288. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120288.
7. Волков А. И., Жарский И. М. Большой химический справочник. М. : Современная школа, 2005. 608 с. ISBN 985-6751-04-7.

## МЕХАНИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОНАПРАВЛЕННОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИЛЫ

### MECHANICAL GENERATOR OF STRONGLY DIRECTED PERIODIC FORCE

В. В. Михеев<sup>1</sup>, В. Н. Кузнецова<sup>2</sup>, И. С. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

V. V. Mikheyev<sup>1</sup>, V. N. Kuznetsova<sup>2</sup>, I. S. Kuznetsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>2</sup>Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

**Аннотация.** В статье рассматриваются теоретические основы теории энергоэффективного генерирования высоконаправленных механических колебаний, основанной на преобразовании силы инерции. Проведен кинематический и динамический анализ сформулированного в работе основного принципа генерирования периодической силы, сосредоточенной преимущественно в одном направлении. В качестве примера приложения предложенного принципа в работе приведена конструкция устройства, порождающего высоконаправленную силу инерции. Проведен подробный статический и динамический анализ устройства и предложены перспективы его практического приложения.

**Ключевые слова:** генераторы колебаний, энергоэффективность, направленные колебания, сила инерции, дебалансные вибровозбудители

**Abstract.** The article concerns theoretical basics for generation of highly-directed mechanical oscillations based on the principle of inertial force transformation. The problem of formulation and analysis of the general principle of transformation of mechanical energy in order to generate periodic force directed preferably along chosen axis is considered also from dynamic and kinematic points. As an example of application for described principle the paper represents generator of highly directed periodic force. Detailed kinematic and dynamic analysis of the device is presented in the article. Perspectives of possible device' technological application are also discussed.

**Keywords:** vibration generators, energy efficiency, directed vibrations, inertial force, unbalanced mass

#### I. ВВЕДЕНИЕ

Циклическое (периодическое) динамическое воздействие на различные объекты и среды широко используется в технике. Технические устройства, используемые для этого, служат для передачи энергии объекту воздействия. Важными параметрами силы воздействия выступают величина, зависимость от времени и направление. Традиционные инерционные вибровозбудители используют движение несбалансированных масс и демонстрируют низкую энергоэффективность ввиду незначительной части энергии, передаваемой объекту [1]. Другим недостатком инерционных возбудителей выступает требование вибрационной защиты других узлов машины и оператора при их работе [7, 14].

Одним из способов устранения указанных недостатков выступает использование планетарных механизмов для генерирования периодических сил. Они могут быть построены без жесткой кинематической связи между бегунком и обечайкой [2, 3] равно как и при наличии такой связи. Это позволяет использовать инерцию самих бегунков [6, 10]. В то же самое время не существует законченной теории построения генераторов высоконаправленных периодических сил. В [9] авторы предложили конструкцию генератора периодической силы высоконаправленного действия (направление вектора силы совпадает с направлением выбранной оси). В дальнейшем класс генераторов высоконаправленных периодических сил был расширен конструкцией ус-

вершенствованного генератора кривошипного типа в [8]. Устройство, представленное в [8] может быть использовано в случае, когда требуемая зависимость генерируемой силы от времени имеет вид гармонической функции или близкий к нему.

Множество сфер применения механических вибрационных возбудителей весьма широко и разнообразно. В их числе могут быть упомянуты: строительство, металлургия [15], разработка измерительных систем [13], вибрационных сит [11] и стендов [12] в сельском хозяйстве и горных работах.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной проблемой, обсуждаемой в работе, является развитие общего подхода к задаче генерирования высоконаправленных инерциальных сил. Источником силы является преобразование вращательного движения водила с низким моментом инерции в возвратно-поступательное движение массивного бегунка вдоль рамы заданной формы. Масса бегунка, размер и форма рамы определяют величину, направление и зависимость производимой силы от времени.

## III. ТЕОРИЯ

Инерционные механические вибровозбудители, использующие движение несбалансированных масс, и ударные возбудители, как правило, кривошипного типа [5] обычно хорошо описываются методами классической механики. При этом решаются уравнения движения системы массивных тел под воздействием периодической силы. В некоторых случаях уравнения могут быть нелинейными и требовать специальных методов решения. [4].

Ниже будет развит метод, возникший в работе [9], расширяющий границы предложенного в ней принципа генерирования высоконаправленных колебаний. Основой этого метода является идея трансформации движения кривошипного механизма особого вида в качание (наподобие маятника) массивного тела.

Источником силы инерции при криволинейном движении в системах несбалансированных масс является центростремительное ускорение

$$\vec{F}_{in} = m\vec{a}_n = m\vec{r}\dot{\psi}^2, \quad (1)$$

где  $m$  – сосредоточенная в центре масс тела его полная масса,  $\vec{r}$  – радиус-вектор центра масс,  $\dot{\psi}$  – угловая скорость центра масс. Условие, при котором сила (1) является направленной вдоль положительного направления оси с ортом  $\vec{e}$  выглядит как

$$\text{sign}(\vec{F}_{in}, \vec{e}) = \text{sign}(|\vec{F}_{in}| \cos(\psi)) = \text{const}. \quad (2)$$

В случае, когда направление силы (1) может зависеть от времени, тогда направление орта  $\vec{e}$  может определять преимущественную ориентацию направления силы, производимой генератором. Тогда условие (2) может быть выписано в форме интеграла по периоду колебаний системы

$$\int_0^T \text{sign}(\vec{F}_{in}(t), \vec{e}) dt \neq 0. \quad (3)$$

Основной идеей предлагаемого в работе устройства получения высоконаправленной периодической силы является преобразование качания водила, соединенного с кривошипным механизмом в движение тяжелого бегунка вдоль рамы, форма которой представляет собой график непрерывной функции двух переменных.

Кинематическая схема устройства представлена на Рис. 1. Рабочий режим устройства реализуется следующим образом. Вращающийся кривошип 1 радиуса  $r$  вызывает движение водила-шатунa 2, осуществляющего качания вокруг узла 3, находящегося на расстоянии  $R$  от оси вращения кривошипа. Узел 3 обеспечивает в том числе и возможность продольного движения водила 2 вдоль своей оси при вращении кривошипа 1. Водило 4 представляет собой продолжение шатунa 2 и обеспечивает движение бегунка 5 по раме 6 (скольжение или вращение в зависимости от конструкции бегунка) при качании водила. Форма

профиля водила параметризуется зависимостью  $\rho(\psi)$  (плоский случай), удобной для дальнейшего рассмотрения.

Далее удобно ввести параметр  $\varepsilon = r/R$  в соответствии с [9] для описания конфигурации и движения системы. Угол отклонения водила  $\psi$  от вертикальной оси зависит от угла поворота  $\varphi$  и может быть выражен следующим образом:

$$\psi(t) = \arctan \frac{\varepsilon \cos \varphi(t)}{1 + \varepsilon \sin \varphi(t)}. \quad (4)$$

Тогда нормальное ускорение бегунка по отношению к профилю рамы, вдоль которого он совершает движение есть

$$\bar{a}_n(t) = \frac{\rho(\psi(t))^2 \dot{\psi}(t)^2}{\rho_0(\psi(t))} \bar{n}, \quad (5)$$

где  $\rho_0(\psi(t))$  – радиус кривизны рамы в зависимости от угла отклонения  $\psi(t)$ . Он может быть разложен по предложенным осям следующим образом:

$$a_{nx}(t) = \frac{\rho(\psi(t))^2 \dot{\psi}(t)^2}{\rho_0(\psi(t))} (\bar{n}, \bar{e}_x), \quad a_{ny}(t) = \frac{\rho(\psi(t))^2 \dot{\psi}(t)^2}{\rho_0(\psi(t))} (\bar{n}, \bar{e}_y). \quad (6)$$

В случае, когда рама представляет собой участок дуги окружности радиуса  $\rho_0 = const$  с центром, расположенным на прямой, соединяющей оси вращения водила и кривошипа. В общем случае расположение центра окружности на оси качания водила необязательно. Тогда компоненты центростремительного ускорения имеют вид

$$a_{nx}(t) = \frac{\rho(\psi(t))^2 \dot{\psi}(t)^2}{\rho_0} \sin \mathcal{G}, \quad a_{ny}(t) = \frac{\rho(\psi(t))^2 \dot{\psi}(t)^2}{\rho_0} \cos \mathcal{G}, \quad (7)$$

где  $\mathcal{G}$  – угол между вектором нормали к профилю рамы в точке нахождения бегунка и осью  $y$  (совпадает с продольной осью водила 2).

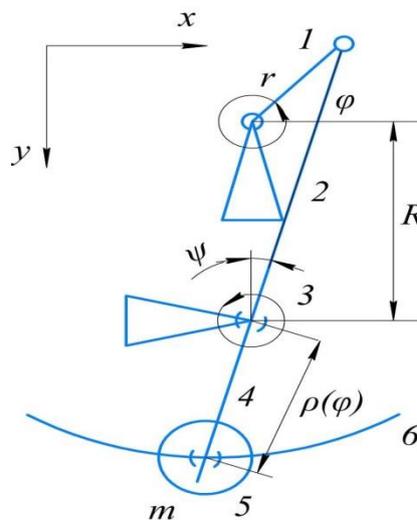


Рис. 1. Кинематическая схема устройства

- 1 – кривошип радиуса  $r$ , 2 – водило, 3 – ось вращения водила на расстоянии  $R$  от оси вращения кривошипа, 4 – радиус вектор скользящего или катящегося бегунка 5 массы  $m$  вдоль рамы 6.

В этом случае угол  $\mathcal{G}$  определяется из решения уравнения (здесь полагается  $\alpha = \rho(0) / \rho_0$ )

$$\tan \psi = \frac{\tan \mathcal{G}}{1 - (1 - \alpha)\sqrt{1 + \tan^2 \mathcal{G}}}.$$

Динамический анализ работы устройства состоит в учете моментов, передаваемых вращающимся кривошипом к перемещающемуся бегунку. В случае, когда кривошип 1 и рама 6 смонтированы на общем основании, воздействие моментов может существенно повлиять на характер ориентации в пространстве силы, производимой устройством, за счет движения бегунка. Выражение для момента, требуемого для движения бегунка есть

$$M = \rho(\psi)^2 \ddot{\psi}$$

и может быть проанализировано при известном виде зависимости  $\rho(\psi)$ .

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим для примера анализ конструкции устройства, представленного выше, когда массивный бегунок 5 перемещается вдоль рамы, представляющей дугу окружности заданного угла и радиуса  $\rho_0$  с центром в точке 3, где располагается центр водила.

В этом случае выражения для силы инерции и сопутствующего углового момента существенно упрощаются:

$$\begin{aligned} \bar{a}_n(t) &= \rho_0 \dot{\psi}(t)^2 \bar{n}, \\ M &= m \rho_0^2 \ddot{\psi}. \end{aligned}$$

Предполагая вращение кривошипа равномерным  $\varphi(t) = \omega t$  с угловой скоростью  $\omega$ , можно получить выражение для  $y$  – компоненты силы инерции, совпадающее с полученным в [9].

$$F_{iny} = m a_{ny}(t) = m \rho_0 \dot{\psi}(t)^2 \cos(\psi(t)) = m \rho_0 \varepsilon^2 \omega^2 \left( \frac{\varepsilon + \sin(\omega t)}{\varepsilon^2 + 2\varepsilon \sin(\omega t) + 1} \right)^2 \cos(\psi(t)) = m \rho_0 \omega^2 \Psi_y(t). \quad (8)$$

График функции  $\Psi_y(t)$  представлен на рис. 2.

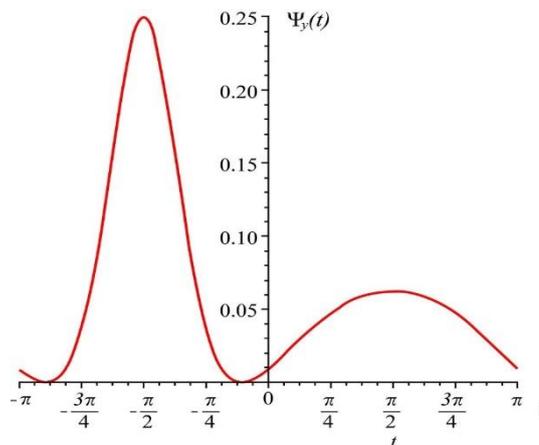


Рис. 2. График зависимости от времени составляющей силы инерции, генерируемой устройством за один поворот кривошипа, ( $\varepsilon = 1/3$ )

Следует упомянуть, что изначально  $y$  – компонента силы инерции – не имела отрицательных значений. Сила, связанная с угловым моментом, обеспечивающим движение бегунка, приложенная к кривошипу, существенно влияет на характер ориентации  $y$  – компоненты силы инерции. Теперь она может быть выражена как

$$F_{rot} = \frac{M}{r_{12}(t)} = m \frac{\rho_0^2}{r} \omega^2 \Phi(t), \quad (9)$$

где  $r_{12}(t) = R \left( \frac{1 + \varepsilon \sin \varphi}{\cos \psi} \right)$  – это длина части водила между кривошипом и узлом 3.

Принимая во внимание, что  $y$  – компонента силы (9) – также приложена к оси рамы, можно получить окончательное выражение для графической зависимости проекции силы, производимой устройством, вдоль оси  $y$ , и приложенной к основанию, общему как для рамы, так и для кривошипа, представленной на рис. 3.

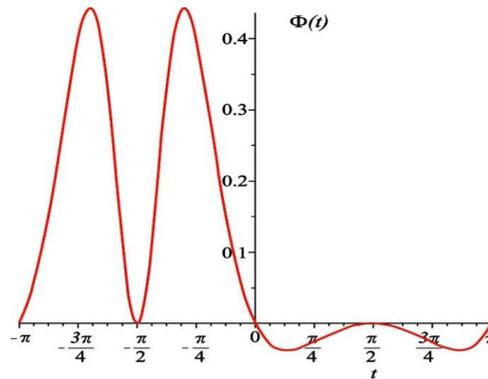


Рис. 3. График обезразмеренной зависимости от времени составляющей силы инерции, генерируемой устройством за один поворот кривошипа, ( $\varepsilon = 1/3$ ) при включении в рассмотрение вращательных моментов устройства

Дальнейший анализ динамики устройства требует рассмотрения сил, необходимых для обеспечения движения водила 2 массы  $m_L$ , вызванного вращением кривошипа 1. Оно может быть представлено как вращение вокруг узла 3 с одновременным сдвигом центра масс водила длины  $L$ . Это может быть включено в рассмотрение с помощью переменного момента инерции водила  $J_L(t)$ .

Требуемый тип движения вызывается вращательным моментом  $M_L$  на кривошипе 1. Сила, приложенная в этот момент к оси кривошипа, может внести существенное возмущение в характер направленности силы инерции, приложенной к общему для кривошипа 3 и бегунка 5

$$M_L = \frac{d(J_L(t)\dot{\psi}(t))}{dt} = J_L(t)\ddot{\psi}(t) + \dot{J}_L(t)\dot{\psi}(t). \quad (10)$$

Момент инерции водила  $J_L(t)$  следует из теоремы Гюйгенса-Штейнера в виде

$$J_L(t) = \frac{m_L L^2}{12} + m_L (\Delta L)^2, \quad (11)$$

где  $\Delta L = |\bar{r}_{12}| - \frac{L}{2} = R \left( \frac{1 + \varepsilon \sin \varphi}{\cos \psi} \right) - \frac{L}{2}$  – расстояние от оси вращения (узла 3) до центра масс водила 2. Водило

2 рассматривается как однородный брус постоянного сечения. Следует, однако, понимать, что зависимость (9) была получена в рамках предположения о безмассовости водила 2. Это далее не может считаться достаточным, поскольку реальное водило в рассматриваемом случае совершает более сложные движения, испытывая значительные механические напряжения, что и должно обладать массой материала, обеспечивающей достаточную прочность. При этом длина водила должна удовлетворять условию  $L > \rho_0 + R + 2r$  для обеспечения рабочего режима устройства.

Величина силы, которая должна быть приложена кривошипом 1 к концу водила 2, вращающегося вокруг узла 3, определяется как

$$F_L = \frac{M_L}{r_{12}} \cdot \quad (12)$$

Эта сила может быть разложена вдоль направлений осей  $x$  и  $y$  следующим образом:

$$\bar{F}_L^{rot} = F_L (-\cos(\psi) \cos(\varphi) + \sin(\varphi) \sin(\psi)) (\cos(\varphi), \sin(-\varphi)) \cdot \quad (13)$$

Тем самым  $y$  – компонента силы, приложенная к кривошипу 1 определяется как

$$\bar{F}_L^{rot} = \frac{M_L}{r_{12}} (-\cos(\psi) \cos(\varphi) + \sin(\varphi) \sin(\psi)) \sin(-\varphi) \cdot \quad (14)$$

График компоненты силы, производимой устройством, вдоль оси  $y$ , и приложенной к его основанию устройства, представлен на рис. 4. Обезразмеренная форма представления не является удобной, поскольку для вычислений требовались значения параметров устройства, конкретизируемые ниже.

Параметр  $\varepsilon = 1/3$ ; масса бегунка  $m = 5 \text{ кг}$ ; расстояние между осью кривошипа 1 и осью вращения водила 2  $R = 0.1 \text{ м}$ ; радиус рамы  $\rho_0 = 0.075 \text{ м}$ ; длина водила 2  $L = 0.25 \text{ м}$ ; масса водила 2  $m_L = 1 \text{ кг}$ ; угловая частота вращения кривошипа  $\omega = 2\pi \cdot 40 \text{ с}^{-1}$ .

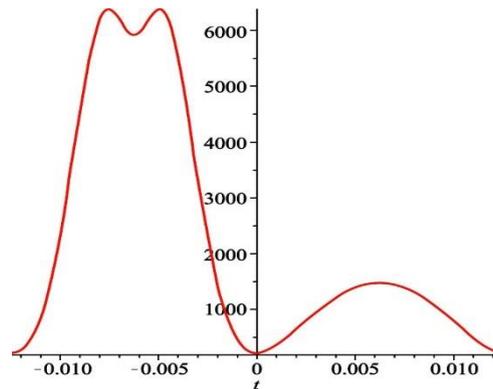


Рис. 4. График зависимости от времени составляющей силы инерции, генерируемой устройством за один поворот кривошипа, вдоль оси (при определенных выше параметрах устройства)

Может быть замечено, что угловой момент на кривошипе, вызывающем движение бегунка, влияет на характер угловой зависимости силы, генерируемой устройством. Тем не менее, хотя это и вносит некоторые отклонения в вид ориентации силы, представленный на рис. 3, но общий вид сохраняется, что позволяет позитивно оценить возможности практического применения устройства.

## V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принцип генерирования высоконаправленной периодической силы инерциальной природы, разработанный в [8, 9], может быть расширен на более широкий спектр зависимостей сил от времени. Это стало возможным благодаря ряду усовершенствований и более подробному анализу:

- 1) использование для движения бегунка рамы произвольной, позволяющее генерировать силу инерции с различной зависимостью от времени;
- 2) использование водила специального вида обеспечивает и допускает движение бегунка по раме произвольной формы;

3) возможность регулировать модуль генерируемой силы не только угловой скоростью кривошипа и параметром  $\varepsilon$ , но и изменением расстояния от оси вращения водила до рамы;

4) рассмотрение при анализе угловых моментов, раскачивающих водило идвигающих бегунок, ведет к незначительному изменению в форме зависимости и направлении производимой устройством силы.

Практическое использование предложенной конструкции устройства генерирования периодической силы представляется эффективным в случае, когда среда или объект воздействия демонстрирует различную реакцию на этапах нагружения и разгрузки. Такое поведение характерно, например, для различных строительных материалов, в частности грунтов основания автомобильной дороги, которые при вибрационном уплотнении практически не испытывают растяжения при изменении направления воздействия.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Научная работа проводится в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ) и Министерство промышленности и научно-технического развития Омской области по теме № 23-29-10010 «Разработка дорожных катков для повышения эффективности транспортного строительства с учетом региональных условий Омской области».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения : межгос. стандарт Российской Федерации : изд. офиц. Введ. 1981-01-01. М. : Стандартинформ. 25 с.
- Пат. 9239 KZ, МПК В 06 В 1/16. Планетарный вибровозбудитель / М. В. Дудкин, П. П. Щетников ; опубл. 17.04.2020.
- Пат. 22221 KZ, МПК В 06 В 1/16. Планетарный вибровозбудитель / М. В. Дудкин, Е. С. Темирбеков, Б. О. Бостанов. № 2008/0086.1 ; заявл. 28.01.2008 ; опубл. 15.01.2010. URL: <https://kzpatents.com/6-22221-planetarnyj-vibrovozбудitel.html> (дата обращения: 09.10.2023).
- Фейгин М. И. Вынужденные колебания систем с разрывными нелинейностями. М. : Наука, 1994. 287 с. ISBN 5-02-014594-7.
- Igumnov L. A., Metrikin V. S., Nikiforova I. V. [et al.] On the theory of multi-pulse vibro-impact mechanisms // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 919. P. 012005-1–012005-12. DOI: 10.1088/1742-6596/919/1/012005.
- Пат. 2381078 Российская Федерация, МПК В 06 В 1/00. Способ получения направленных механических колебаний и устройство для его осуществления / И. К. Исаев, М. Д. Герасимов. № 2007148177/28 ; заявл. 27.06.2009 ; опубл. 10.02.2010. Бюл. № 4.
- Корчагин П. А., Тетерина И. А. Результаты экспериментальных исследований уровня вибрационного воздействия на оператора дорожной уборочно-подметальной машины // *Вестник СибАДИ*. 2015. № 2. С. 25–30.
- Mikheyev V. V. Generator of periodic inertia force concentrated in one direction // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441. P. 012106-1–012106-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012106.
- Mikheyev V. V. New type of vibration generator with vibratory force oriented in preferred direction // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2018. Vol. 6. P. 149–154. DOI: 10.1007/s42417-018-0025-4.
- Mikheyev V. V., Saveliev S. V. Planetary adjustable vibratory exciter with chain gear // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1210. P. 012097-1–012097-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012097.
- Zeng M., Xu Z., Zhang J. [et al.] The multilayer and wide-deck vibrating screen based on the innovative long-span vibration exciter // *Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 231. P. 012018-1–012018-5. DOI: 10.1088/1757-899X/231/1/012018.
- Nizhegorodov A. I., Gavrilin A. N., Moyzes B. B. Hydrostatic Vibratory Drive of the Test Stand for Excitation of the Amplitude-Modulated Vibrations // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 671. P. 012037-1–012037-6. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012037.
- Rui-Jun L., Ying-Jun L., Lian-Sheng Z. [et al.] High-precision and low-cost vibration generator for low-frequency calibration system // *Measurement Science and Technology*. 2018. Vol. 29, no. 3. P. 034008-1–034008-7. DOI: 10.1088/1361-6501/aa9f6d.
- Thomas O., Ducarne J., Deü J-F. Performance of piezoelectric shunts for vibration reduction // *Smart Materials and Structures*. 2012. Vol. 21, no. 1. P. 015008-1–015008-16. DOI: 10.1088/0964-1726/21/1/015008.
- Вагапов И. К., Ганиев М. М., Шинкарев А. С. Теоретическое и экспериментальное исследование динамики ультразвуковой виброударной системы с промежуточным бойком // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2008. № 5. С. 3–24.

УДК: 53.097, 53.043

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-23-28

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИОНОВ В ЛИНЕЙНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ С ЗАПИРАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

### FEATURES OF ION DYNAMICS IN LINEAR QUADRUPOLE TRAP WITH END-CAP ELECTRODES

С. С. Рудый, Д. П. Щербинин, А. В. Иванов

*Международный научно-образовательный центр Физики Наноструктур, Университет ИТМО,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

S. S. Rudyi, D. P. Shcherbinin, A. V. Ivanov

*IR&EC PhysNano, ITMO University, Saint-Petersburg, Russia*

**Аннотация.** В настоящей работе рассмотрены особенности локализации одиночных ионов  $\text{Ca}^+$  в линейной квадрупольной ловушке Пауля с круглыми запирающими электродами. Продемонстрирована возможность реализации квазипериодических и хаотических режимов динамики в консервативном случае, определены условия возникновения хаотического режима. В работе приведена численная симуляция динамики и показано расщепление области локализации в зависимости от соотношения компонент напряжений на силовых и запирающих электродах.

**Ключевые слова:** ионная ловушка, ловушка Пауля, хаотическая динамика, отображения Пуанкаре, показатели Ляпунова

**Abstract.** In this paper we consider the features of ion trapping in a linear quadrupole Paul trap with circular end-cap electrodes. The quasi-periodic and chaotic regimes of the ion dynamics in the conservative case are shown. The conditions for the transition from the quasi-periodic to the chaotic regime are determined. We present a numerical simulation of the ion dynamics and describe the splitting of the localization region as a function of the ratio of the voltage components on the power and end-cap electrodes.

**Keywords:** ion trap, Paul trap, chaotic dynamics, Poincare map, Lyapunov exponents.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Линейная квадрупольная ловушка – один из наиболее распространенных инструментов для электродинамической локализации и управления заряженными частицами [1]. Вместе с тем прослеживаются несколько основных тенденций, определяющих дальнейшее развитие электродинамической локализации и квадрупольной масс-спектрометрии. Так, например, ловушки с миниатюризированной геометрией электродов [2-3], а также ловушки с разводкой электродов по поверхности диэлектрической подложки [4-5] обладают потенциальным применением в квантовых вычислениях и квантовой коммуникации [6]. Другим перспективным направлением является разработка ловушек с формой поверхности электродов, максимально приближенной к гиперболической [7]. Поле вокруг таких электродов наиболее приближено к идеальному мультипольному распределению потенциала. И, напротив, в ряде исследований применялось кардинальное упрощение формы электродов с сохранением возможности локализации [8]. Таким образом, ионные (или, в более широком смысле, электродинамические) ловушки с различной конфигурацией электродов применяются для удержания, манипуляции и исследования различных объектов от атомарных ионов и молекулярных структур до микрочастиц и биологических объектов.

Процесс локализации заряженных частиц во всех перечисленных конфигурациях ловушек описывается решением динамических уравнений. При этом прослеживается очевидная взаимосвязь между конструктивной сложностью ловушки и математическим аппаратом, описывающим процесс локализации: динамика ионов в наиболее технологически сложных ловушках обычно описывается наиболее простой математической моделью. Так, для идеальных квадрупольных ловушек математическое описание динамики

сводится к уравнениям Матъе, а анализ масс-селективных характеристик – к диаграммам Айнса-Стерта [9]. В тоже время настоящее описание зачастую применяется и для динамики ионов в ловушках с упрощенной геометрией электродов, что, строго говоря, не вполне корректно ввиду краевых эффектов. Кроме того, классические линейные квадрупольные ловушки, используемые в качестве масс-фильтров в технике масс-спектрометрии, позволяют ограничивать динамику исследуемых объектов только по двум степеням свободы. Простым техническим решением для достижения устойчивой локализации по трем степеням свободы является использование запирающих электродов. При этом с математической точки зрения система становится существенно нелинейной, а динамика будет описываться системой связанных нелинейных осцилляторов. Такая нелинейность и взаимосвязанность будет приводить к ряду эффектам принципиально нереализуемых в стандартных масс-фильтрах. Уже было показано, что локализация заряженных частиц в ловушках Пауля может приводить к формированию дополнительных областей локализации, в том числе за пределами рабочей области ловушки [10]. Становится очевидно, что необходимо проведение исследований, направленных на обнаружение особенностей процессов локализации в таких системах.

Цель настоящего исследования – определение условий хаотизации динамики одиночного иона в линейной квадрупольной ловушке Пауля с круглыми запирающими электродами. Переход от квазипериодического режима динамики к хаотическому достигается за счёт изменения постоянного напряжения на запирающем электроде. В работе приведен численный анализ динамики и показано расщепление области локализации в зависимости от соотношения компонент напряжений на силовых и запирающих электродах. Продемонстрирована возможность реализации квазипериодических и хаотических режимов динамики в консервативном случае.

## II. О ЛОКАЛИЗАЦИИ В ЛИНЕЙНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛОВУШКАХ

При решении поставленной задачи будем считать, что исследуемая заряженная частица (атомарный ион) локализуется в радиочастотной ловушке, состоящей из четырех стержневых электродов с гиперболической формой рабочей (внутренней) поверхности и цилиндрической формой внешней поверхности; а также двух запирающих электродов с круговым сечением. Схема радиочастотной ловушки представлена на рис. 1.

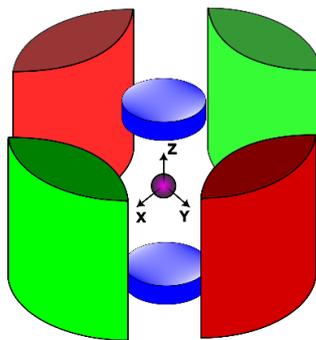


Рис. 1. Принципиальная схема линейной квадрупольной ловушки с запирающими электродами. Зелёным и красным отмечены стержневые электроды с гиперболической рабочей поверхностью и напряжением в фазе и противофазе. Синим показаны запирающие электроды

На стержневые электроды подается переменное напряжение в противофазе, как отмечено на рис. 1 зелёным и красным соответственно. На запирающие электроды подается постоянное напряжение. Локализация ионов осуществляется за счет взаимодействия заряженной частицы с полем ловушки; частица отмечена фиолетовым на рис. 1. При локализации одиночного иона в вакууме, справедливы следующие допущения.

- 1) Сила тяжести, действующая на ион, пренебрежимо мала.
- 2) Динамика иона подчиняется законам классической механики и может быть описана в рамках формализма Лагранжа.
- 3) Локализация осуществляется в вакууме, что позволяет пренебречь диссипативными силами.
- 4) На частотах, соответствующих условиям устойчивой локализации одиночных ионов (до 10 МГц), электрическое поле допустимо рассчитывать в электростатическом приближении.
- 5) Рабочая (внутренняя) поверхность стержневых электродов является идеально-гиперболической. Внешняя поверхность стержневых электродов является цилиндрической.

б) На запирающие электроды подаётся постоянное напряжение, знак которого совпадает со знаком заряда иона.

7) Присутствует экранирование в виде сферического электрода (рис. 1). Минимальное значение радиуса экранирующего электрода ограничено длиной стержневых электродов.

Таким образом, для описания динамики ионов необходимо и достаточно рассмотрения взаимодействия с полем ловушки в виде

$$W(x, y, z) = eU(x, y, z), \quad (1)$$

где  $W$  – потенциальная энергия электростатического взаимодействия,  $e$  – заряд частицы,  $U(x, y, z)$  – пространственное распределение потенциала. В случае локализации ионов силой тяжести пренебрегается.

Следуя В. Паулю [11], пространственное распределение электрического потенциала в линейных квадрупольных ловушках с гиперболической формой стержневых электродов и отсутствии запирающих электродов может быть описано в виде

$$U_R(x, y) = \frac{V_0 \cos(\omega t)}{2r_0^2} (x^2 - y^2), \quad (2)$$

где  $r_0$  – радиус ловушки,  $V_0, \omega$  – амплитуда и частота переменного напряжения на электродах. Как следует из (2), поле стержневых электродов ловушки не ограничивает аксиальную динамику вдоль оси  $oz$  (рис. 1).

Между тем настоящее описание справедливо только для случая стержневых электродов бесконечной длины. На практике при ловушке конечной длины аксиальная динамика ограничивается потенциальной ямой, существование которой обусловлено краевыми эффектами. Глубина такой потенциальной ямы при этом не превышает  $10^{-3}$  В при единичном напряжении на электродах и не может быть использована для осуществления управляемой аксиальной локализации. Кроме того, конечные габариты гиперболических электродов также дают деформацию пространственного распределения потенциала относительно (1). Таким образом, для обеспечения локализации по трём степеням свободы, необходимо использовать запирающие электроды.

Для описания пространственного распределение потенциала, было произведено решение уравнения Лапласа в виде

$$\Delta U(x, y, z) = 0. \quad (3)$$

Граничные условия имеют вид

$$U(x, y, z)|_{\Omega} = f_V(x, y, z), \quad (4)$$

где  $f_V(x, y, z)$  соответствует напряжению на стержневых и запирающих электродах. Для геометрии ловушки (см. допущение 5), представленной на рис. 1, функция  $f_V(x, y, z)$  может быть записана в виде

$$f_V(x, y, z) = \begin{cases} V_0 \cos(\omega t), & x^2 - y^2 = r_0^2, x^2 + y^2 < 4r_0^2, |z| < L \\ V_0 \cos(\omega t), & x^2 - y^2 > r_0^2, x^2 + y^2 = 4r_0^2, |z| < L \\ V_0 \cos(\omega t), & x^2 - y^2 > r_0^2, x^2 + y^2 < 4r_0^2, |z| = L \\ -V_0 \cos(\omega t), & -x^2 + y^2 = r_0^2, x^2 + y^2 < 4r_0^2, |z| < L \\ -V_0 \cos(\omega t), & -x^2 + y^2 > r_0^2, x^2 + y^2 = 4r_0^2, |z| < L \\ -V_0 \cos(\omega t), & -x^2 + y^2 > r_0^2, x^2 + y^2 < 4r_0^2, |z| = L \\ V_E & x^2 + y^2 = r_E^2, |z| > L - d, |z| < L + d \\ V_E & x^2 + y^2 < r_E^2, |z| = L - d \\ V_E & x^2 + y^2 < r_E^2, |z| = L + d \\ 0 & x^2 + y^2 + z^2 = R_m^2 \end{cases} \quad (5)$$

где  $r_E$  – радиус запирающего электрода,  $d$  – ширина запирающего электрода,  $V_E$  – напряжение на запирающем электроде,  $2L$  – длина стержневых электродов,  $R_m$  – радиус экранирования. Внешняя поверхность стержневых электродов ограничена цилиндрической поверхностью с радиусом  $2r_0$ . Гиперболическая форма рабочей поверхности стержневых электродов позволяет задавать граничные условия попарно для электродов с синфазным питанием (пары одноцветных стержневых электродов на рис. 1. Метрические значения размеров ловушки приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1  
МЕТРИЧЕСКИЕ ЗНАЧЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЛОВУШКИ

Величина	$2L$	$r_0$	$r_E$	$d$	$R_m$
Значение, мм.	50	10.5	8	8	75

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Решение осуществлялось методом конечных элементов (FEM) с минимальным линейным размером элемента  $10^{-6}$  м, напряжение на силовых электродах принято 250 В, частота переменного напряжения 7 МГц, напряжение на запирающих электродах варьировалось в диапазоне 1...300 В. Расчёт проводился в программной среде Wolfram Mathematica с использованием подключаемой библиотеки NDSolve`FEM. Рассчитанное распределение потенциала для заданной геометрии электродов и напряжений 10 В, 100 В, 270 В, в начальный момент времени  $t = 0$  представлены в верхней части рис. 2.

Уравнения движения примут вид

$$m\ddot{Q} = -e \frac{\partial f_V(x, y, z)}{\partial Q}, \quad (6)$$

где  $Q$  – обобщённая координата,  $m$  – масса объекта локализации.

Для исследования особенностей динамики предлагается рассматривать процесс локализации одиночного иона  $\text{Ca}^+$  при инжекции с координатами  $x_0, y_0 \in -5...5$ , мм при нулевой скорости. Решение уравнений движения для заданных начальных условий производилось методом Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным шагом интегрирования в программной среде Wolfram Mathematica (в соответствии с алгоритмом, реализуемым в [12]). В нижней части рис. 2 приведены отображения Пуанкаре в плоскости  $(x, \dot{x})$  по результатам симуляции динамики иона  $\text{Ca}^+$  при  $t = 0..5$  с для указанных значений напряжения на запирающих электродах.

На рис. 2, при значении напряжения на запирающих электродах 10 В, фазовый портрет представляет серию инвариантных кривых с неподвижной точкой вблизи геометрического центра ловушки, соответствующего началу координат. С увеличением возмущения (напряжения на запирающих электрод) происходит разрушение внешней области с образованием стохастического слоя, разделяющего области регулярного движения при начальных условиях  $x_0 > 4$  мм (рис. 2б.). С последующим увеличением параметра постоянного напряжения, центральная неподвижная точка бифуркационно расщепляется (рис. 2в). Практически существование точки бифуркации при напряжении на запирающих электродах 265 В характеризует оформление двух независимых параболических положений равновесия по рассматриваемой степени свободы, т. е. трансформацию параболического потенциала к многоямной форме.

Физически, при инжекции частицы вблизи устойчивого положения равновесия, будет реализовываться квазипериодический динамический режим. Анализ динамических режимов в зависимости от начальных условий (координат инжекции) может быть выполнен с помощью формализма показателей Ляпунова. При инжекции иона вблизи устойчивого положения равновесия динамика остаётся квазипериодической при  $t \rightarrow \infty$ . Область пространства начальных условий, при которых выполняется условие, выше называется областью устойчивой локализации. Квазипериодической динамике соответствует нетривиальный показатель Ляпунова  $\lambda = 0$  в консервативной системе. В случае хаотической динамики наблюдается расходимость траекторий в фазовом пространстве, нетривиальный показатель Ляпунова принимает положительное значение. На рис. 3а приведен расчет показателей Ляпунова методом ортогонализации Грама-Шмидта в соответствии с алгоритмом, описанным [12]. Расчёт произведён для напряжения на запирающих электродах  $V_E = 270$  В в зависимости от начальных координат инжекции  $x_0$  и  $y_0$ . Синим отмечены значения, соответствующие квазипериодическому режиму ( $\lambda = 0$ ). Так, при малом возмущении, динамика в плоскости  $x, y$  характеризуется одним положением равновесия и, соответственно, одной областью устойчивой локализации. Увеличение напряжения на торцевых электродах приводит к деформации области устойчивой локализации вплоть до формирования четырех новых пространственно-изолированных областей устойчивой локализации в плоскости  $x, y$ , соответствующих новым устойчивым положениям равновесия.

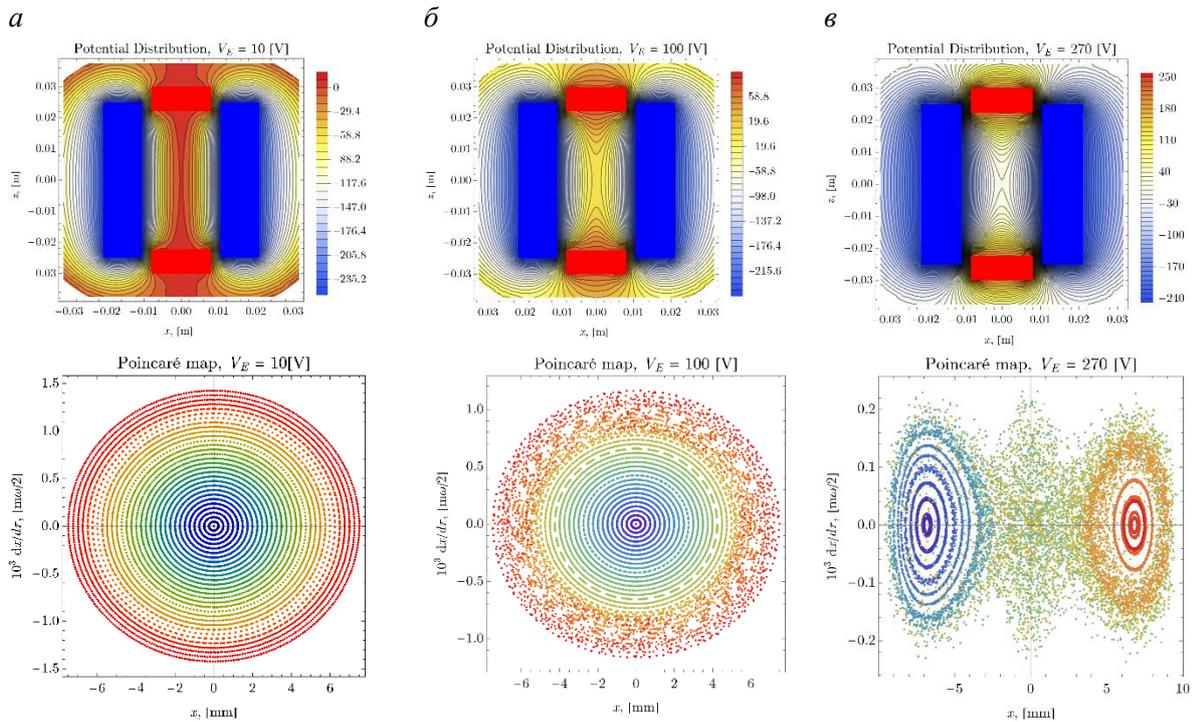


Рис 2. Пространственное распределение потенциала при  $t = 0$  и отображения Пуанкаре при различных напряжениях на запирающих электродах, а) – 10 В, б) – 100 В, в) – 270 В

Полученный результат может быть объяснен с использованием формализма эффективного потенциала, определяемого как средняя кинетическая энергия быстрых осцилляций в осциллирующем потенциальном поле. На рис. 3б представлено сечение эквипотенциальных поверхностей эффективного потенциала в плоскости  $x_0$  для напряжения на запирающих электродах  $V_E = 270$  В. Произведена нормировка на максимальное значение. Зелёными точками отмечены локальные минимумы эффективного потенциала. Результат расчёта эффективного потенциала полностью удовлетворяет результатам расчёта карты нетривиального показателя Ляпунова при выбранных параметрах напряжения.

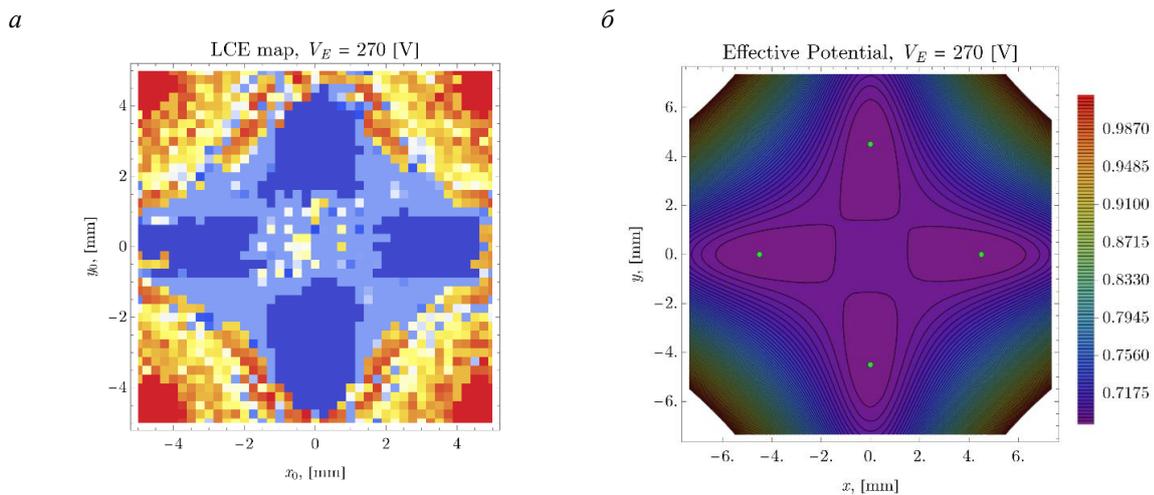


Рис 3. Карта нетривиального показателя Ляпунова для случая  $V_E = 270$  (а) и соответствующий эффективный потенциал (б)

Эвристически формирование дополнительных положений равновесия может быть описано как “натягивание” радиально-симметричного потенциала запирающих электродов на цилиндрический

эффективный потенциал, деформированный за счет краевых эффектов, связанных с радиальной конечностью стержневых электродов. При этом увеличение напряжения на запирающих электродах приводит к смещению четырёх новых положений равновесия в радиальной плоскости ближе к краю ловушки. Стоит отметить, что координаты новообразованных положений равновесия определяются не только геометрией ловушки, но и соотношением заряда к массе локализованного объекта. Данный детерминизм позволяет использовать описанный в работе эффект для реализации пространственной селекции и определения параметров заряженных частиц.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были рассмотрены особенности локализации одиночных ионов  $\text{Ca}^+$  в линейной квадрупольной ловушке Пауля с круглыми запирающими электродами. Был произведен численный анализ динамики и показано расщепление области локализации в зависимости от соотношения компонент напряжений на силовых и запирающих электродах с формированием четырёх устойчивых положений равновесия. Рассчитан эффективный потенциал для ионов  $\text{Ca}^+$  в предложенной геометрии ловушки.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 22-42-05002.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. March R. E. Quadrupole ion traps // *Mass spectrometry reviews*. 2009. Vol. 28, no. 6. P. 961–989. DOI: 10.1002/mas.20250.
2. Snyder D. T., Pulliam C. J., Ouyang Z. [et al.] Miniature and fieldable mass spectrometers: recent advances // *Analytical chemistry*. 2016. Vol. 88, no. 1. P. 2–29. DOI: 10.1021/acs.analchem.5b03070.
3. Decker T. K., Tian Y., McClellan J. S. [et al.] Optimal fabrication methods for miniature coplanar ion traps // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2018. Vol. 32, no. 4. P. 289–294. DOI: 10.1002/rcm.8028.
4. Bahrami A., Müller A., Drechsler M. [et al.] Operation of a Microfabricated Planar Ion-Trap for Studies of a Yb+Rb Hybrid Quantum System // *Physical Status Solidi. B*. 2019. Vol. 256, no. 9. P. 1800647-1–1800647-9. DOI: 10.1002/pssb.201800647.
5. Debatin M., Kröner M., Mikosch J. [et al.] Planar multipole ion trap // *Physical Review. A*. 2008. Vol. 77. P. 033422-1–033422-6. DOI: 10.1103/PhysRevA.77.033422.
6. Eltony A. M., Gangloff D., Shi M. [et al.] Technologies for trapped-ion quantum information systems: Progress toward scalability with hybrid systems // *Quantum Information Processing*. 2016. Vol. 15. P. 5351–5383. DOI: 10.1007/s11128-016-1298-8.
7. Nolting D., Malek R., Makarov A. Ion traps in modern mass spectrometry // *Mass spectrometry reviews*. 2019. Vol. 38. P. 150–168. DOI: 10.1002/mas.21549.
8. Douglas D. J., Kononkov N. V. Mass resolution of linear quadrupole ion traps with round rods // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2014. Vol. 28, no. 21. P. 2252–2258. DOI: 10.1002/rcm.70182252.
9. Kajita M. *Ion Traps: A gentle introduction*. IOP Publishing, 2022. 156 p. ISBN 978-075035-470-7.
10. Rudyi S. S., Vovk T. A., Kosternoy I. A. [et al.] Outside localization around a toroidal electrode of a Paul trap // *Journal of Physics Communications*. 2020. Vol. 4. P. 015022-1–015022-7. DOI: 10.1088/2399-6528/ab5cd6.
11. Пауль В. Электромагнитные ловушки для заряженных и нейтральных частиц // *Успехи физических наук*. 1990. Т. 160, № 12. С. 109–127. DOI: 10.3367/UFNr.0160.199012d.0109.
12. Binous H., Zakia N. An improved method for Lyapunov exponents computation // *Wolfram Library Archive*. – URL: <http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/7109/> (date accessed: 08.09.2023).

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЗЕМЛЕРОЙНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ВСКРЫТИИ УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

### OPTIMIZATION OF EXCAVATION EQUIPMENT OPERATION DURING PIPELINE SECTION OPENING

А. Ю. Турыбрин<sup>1</sup>, А. В. Бубнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Транснефть Надзор» ОП «Омское УСК», г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

A. Yu. Turybrin<sup>1</sup>, A. V. Bubnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>"Transneft Supervision" OP "Omsk USK," Omsk, Russia

<sup>2</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Аннотация.** В целях определения способа оптимизации земляных работ при вскрытии участков трубопровода для проведения ремонтных работ, направленных на сокращение объемов ручного труда и сокращение времени выполнения работ, автором рассмотрена перспективная конструкция оборудования одноковшового экскаватора для осуществления местного подкопа трубопровода, который производится после отрытия боковых траншей, и рассмотрена методика выполнения работ с применением одноковшового экскаватора, оснащенного модернизированным ковшом. Выполнен расчет эффективности и экономической целесообразности применения предложенного технического решения с проведением расчета себестоимости выполнения работ по вскрытию участка протяженностью 10 м трубопровода, выполнено сравнение полученной себестоимости с себестоимостью выполнения работ по вскрытию и подкопу участка классическими методами.

**Ключевые слова:** одноковшовый экскаватор, земляные работы, трубопровод, ремонт изоляции, вскрытие участка трубопровода, подкоп трубопровода, механизации технологических операций, сокращение объемов ручного труда, экономическая эффективность

**Abstract.** In order to determine the method of optimizing earthworks when opening pipeline sections for repair work aimed at reducing the volume of manual labor and reducing the time for work, the author considered the promising design of the equipment of a single-bucket excavator for local pipeline backfilling, which is carried out after opening the side trenches and considered the method of work using a single-bucket excavator equipped with a modernized bucket. The efficiency and economic feasibility of using the proposed technical solution were calculated with the calculation of the cost of performing work on the opening of a section with a length of 10 m of the pipeline, the obtained cost was compared with the cost of performing work on opening and breaking the section using classical methods.

**Keywords:** single-bucket excavator, earthworks, pipeline, insulation repair, pipeline section opening, pipeline undercutting, process operations mechanization, manual labor reduction, economic efficiency.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все больше крупных компаний, занимающихся строительством и ремонтом трубопроводов, стали применять метод ремонта трубопровода с полной заменой труб (в том числе на трубы, прошедшие восстановление в заводских условиях) [1]. С 2008 года данные методы ремонта стали активно применяться на объектах ПАО «Газпром» [2, 3]. С 2013 года ПАО «Транснефть» отменен регламент, предусматривающий выполнение работ по строительству и плановой замене изоляции трубопроводов с выполнением работ изоляции в трассовых условиях [4].

Одной из основных причин постепенного отказа от метода строительства и ремонта трубопроводов с применением изоляционных машин в трассовых условиях стало то, что при существующих технологиях невозможно обеспечить выполнение изоляционного покрытия в полевых условиях по качеству и долговечности, приближенного к заводской изоляции [5].

Применение труб с заводской изоляцией, выполнение ремонтов участков магистрального трубопровода с полной заменой труб и отказ от выполнения работ по плановой замене изоляции на протяженных участках магистрального трубопровода в трассовых условиях влекут за собой рост объемов выполнения работ по оперативному ремонту отдельных повреждений изоляции трубопровода на локальных участках трубопровода.

В тоже время сохраняется тенденция по механизации технологических операций при выполнении локального ремонта поврежденной изоляции с целью получения наиболее стабильного качества выполнения работ. Так, на объектах ПАО «Транснефть» с 2021 внесены требования [6] по обязательному применению средств малой механизации (далее - СММ) при выполнении работ по замене поврежденных участков изоляции. Применение СММ повлекло за собой заметное увеличение минимальных размеров рабочих котлованов. Так, согласно требованиям [6], минимальное расстояние от основания котлована до нижней образующей трубы при ручном способе нанесения антикоррозионного покрытия (далее – АКП) составляет 0.6 м, а при нанесении АКП с применением СММ минимальное расстояние от дна рабочего котлована до нижней образующей трубопровода составляет 1.0 м (расстояние обусловлено, в том числе габаритными размерами СММ). Таким образом, переход на технологию выполнения работ с применением СММ привел к увеличению объема земляных работ по разработке грунта под трубопроводом более чем в 1.65 раз.

Отказ от массового использования подкопочных машин (при замене изоляции на протяженных участках трубопроводов) и возросший объем земляных работ при вскрытии локальных участков трубопровода поднимают вопрос об универсальном средстве (оборудовании), позволяющем без длительных перерывов для замены оснастки эффективно выполнять вскрытие и подкоп на отдельных участках трубопроводов с сокращением объемов ручного труда при выполнении земляных работ.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотреть способы оптимизации земляных работ при вскрытии участков трубопровода для проведения ремонтных работ, направленные на сокращение объемов ручного труда. Рассмотреть перспективную конструкцию оборудования для осуществления местного подкопа трубопровода, который производится непосредственно после открытия боковых траншей.

## III. ТЕОРИЯ

В ходе анализа существующей технологии выполнения земляных работ по вскрытию участка трубопровода для проведения ремонта [6, 7, 8] и рассмотрения возможных вариантов и способов вскрытия участков трубопровода с выполнением подкопа с учетом необходимости обеспечения оптимальной логистики перемещения техники и оборудования от места базирования к точке выполнения работ были определены основные требования к оборудованию для выполнения локальных подкопов трубопровода:

- цикличность выполнения работ без осуществления дополнительных остановок с целью выполнения доработок либо монтажа оборудования перед началом выполнения подкопа;
- оборудование должно монтироваться на штатную технику организации, выполняющей работы по вскрытию участков трубопровода.

Рассмотрим оборудование, которое может быть использовано для выполнения подкопа участков трубопровода рис. 1. Ковш подкопочный одноковшового экскаватора [9] представляет собой доработку стандартного ковша одноковшового экскаватора с дополнительными режущими элементами, боковыми стенками с окнами, боковыми телескопическими, состоящими из двух сегментов оснований еще одного сегмента с закрепленным на нем режущим приспособлением (нож, зубья), открывками, установленными на корпусе шарнирно с возможностью поворота и снабженных приводом из силовых цилиндров. Сегмент с закрепленным на нем режущим приспособлением всегда расположен параллельно относительно оси ковша при помощи 2х жестких тяг, закрепленных шарнирно, и образующей между сегментом, тягами и корпусом ковша параллелограмм, что позволяет обеспечить постоянный угол резания при различном вылете открывка. Модернизация ковша может быть выполнена как с одной из сторон ковша, так и с двух сторон, при этом при двухсторонней

модернизации достигается большая универсальность применения экскаватора, оснащенного данным ковшом, и обеспечивается более равномерный износ пальцев, втулок ковша и стрелы экскаватора.

Преимущества: одноковшовый экскаватор, оснащённый доработанным ковшом, может в полном объеме осуществлять стандартные операции копания и может осуществлять подкоп трубопровода непосредственно сразу после открытия участка боковой траншеи без необходимости остановок для выполнения доработок и отвечает всем требованиям к оборудованию для выполнения локальных подкопов трубопровода, указанным ранее.

Недостатки: более сложная схема дополнительного оборудования, наличие дополнительных линий гидросистемы с собственным контроллером, увеличение массы ковша после доработок, невозможность применения для подкопа трубопроводов от Ду820 и выше.

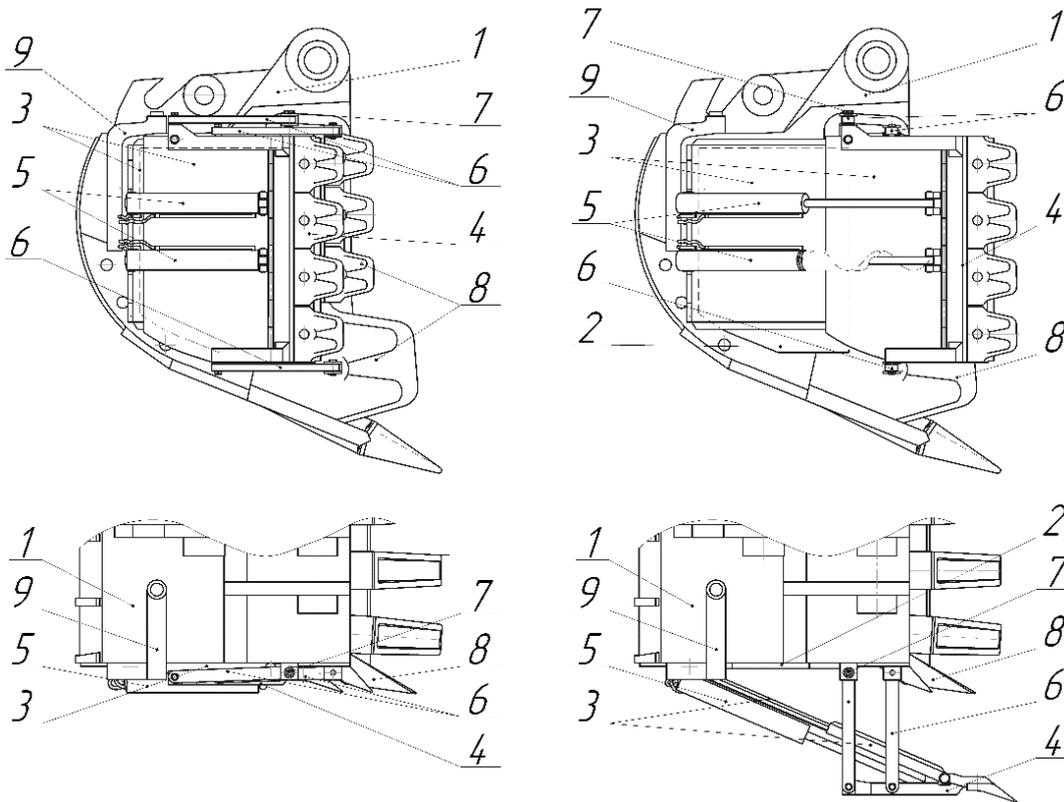


Рис. 1. Ковш подкопный:

- 1 – Стандартный ковш, 2 – Боковое окно, 3 – Телескопические сегменты открылка,  
 4 – Открывок с режущим приспособлением, 5 – Гидроцилиндры, 6 – Тяги бокового открылка,  
 7 – Датчик угла поворота, 8 – Боковые ножи, 9 – Защитный кожух гидравлических линий

Предлагаемая схема организации работ с использованием экскаватора с модернизированным рабочим оборудованием отличается от стандартной в том, что позволяет выполнить после снятия бульдозером плодородного слоя почвы полный объем земляных работ как по разработке боковых траншей, так и подкопа нефтепровода при помощи одноковшового экскаватора без использования подкопной машины с максимальным снижением объемов земляных работ, выполняемых ручным способом.

Процесс разработки боковой траншеи модернизированным ковшом аналогичен процессу разработки при помощи серийного ковша и выполняется с полностью сложенными боковыми открывками. В процессе разработки боковых траншей необходимо произвести удаление грунта из-под трубопровода. Для удаления грунта из-под трубы сначала с закрытыми открывками открывается боковая траншея, глубиной ниже основания трубы, достаточной для того, чтобы открываемый в бок открывок, находясь своей верхней точкой на безопасном расстоянии от трубопровода (не менее 0.2 м), мог совершать колебательные движения рис. 2. После этого оператор экскаватора включает подачу гидравлической жидкости в поршневую полость гидроцилиндров привода открывка. При этом режущая часть открывок продвигается вперед и, опираясь на шарнирные тяги, открывки открываются до положения, соответствующего максимальной толщине стружки для данного типа грунта. Оператор контролирует вылет открывка визуально и исходя из показаний датчика угла поворота шарнирных тяг магниторезистивного типа. Одновременно с открытием открывка оператор задействует пово-

ротную платформу, гидроцилиндры стрелы и рукояти, совершает боковым открылком ковша экскаватора копательное движение в плоскости параллельной оси трубопровода до полного заглубления открылка, после чего возвращает ковш в исходное положение. Из исходного положения, выдвигая боковой открылок дополнительно на величину, равную максимальной толщине стружки, повторяет копательное движение. Процесс длится до достижения максимального вылета открылка либо до расчетной оси трубопровода рис. 3, рис. 4.

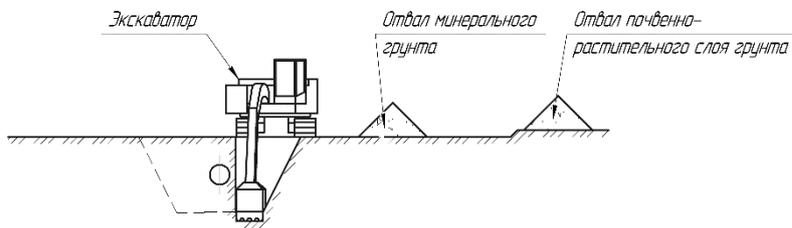


Рис. 2. Разработка боковой траншеи

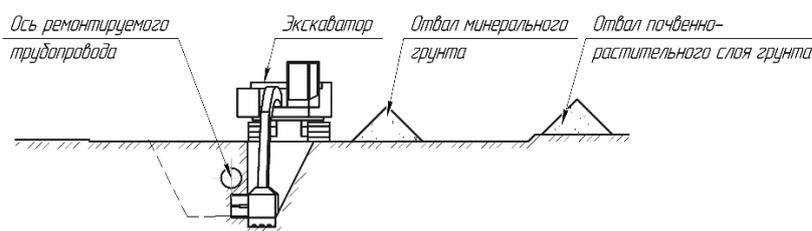


Рис. 3. Полу-подкоп нефтепровода боковым открылком

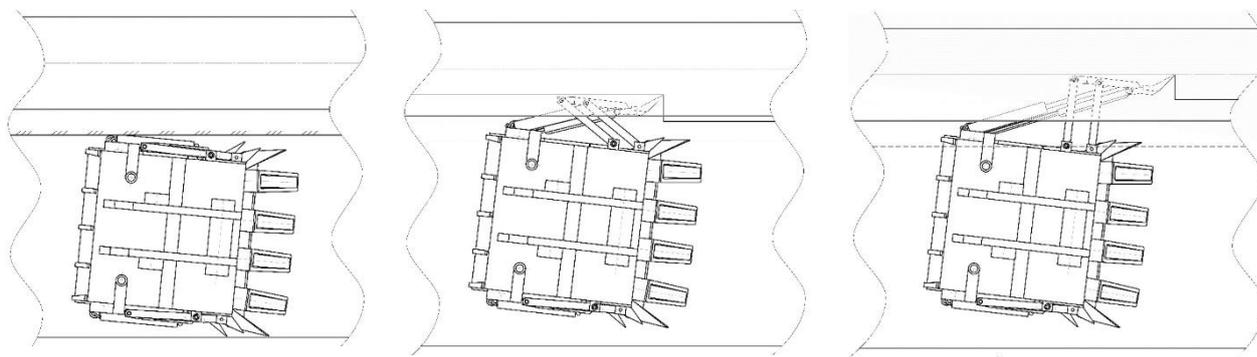


Рис. 4. Полу-подкоп нефтепровода боковым открылком ковша (вид сверху)

По окончании подкопа оператор включает подачу жидкости в штоковую полость гидроцилиндров привода открылка, закрывает его.

Разработка грунта с другой стороны трубопровода производится аналогичным способом, только при этом используется другой открылок и другая пара силовых цилиндров рис. 5, рис. 6.

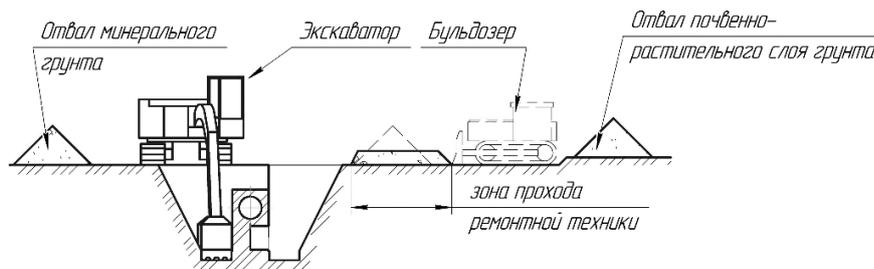


Рис. 5. Разработка второй боковой траншеи

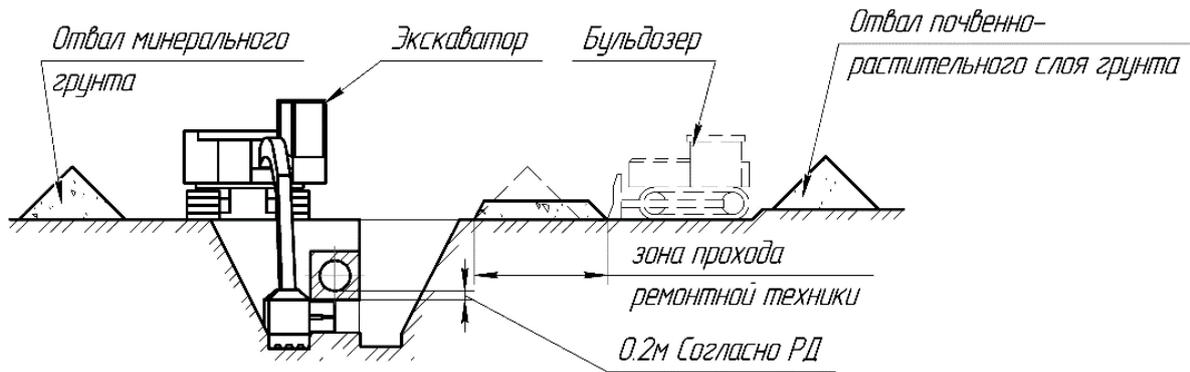


Рис. 6. Завершение подкопа

С целью проверки возможности оснащения стандартного одноковшового экскаватора подобным модернизированным ковшом с рабочими боковыми открьлками был проведен расчет сил сопротивления копанью грунта возникающих на режущей кромке бокового открьлка по методикам, предложенным Н.Г Домбровским [10] и Ю.А. Ветровым [11].

Для проведения расчетов были приняты следующие параметры: удельное сопротивление рассматриваемого грунта копания - 240кПа, плотность грунта (суглинок) – 2.05 т/м<sup>3</sup>, толщина срезаемой стружки – 0.14 м, ширина бокового открьлка (ширина срезаемой стружки) – 1.05 м.

В ходе проведенных расчетов было получено значение суммарной силы сопротивления копания грунта по методике Н.Г Домбровского равное 56.41 кН, по методике Ю. А. Ветрова равное 56.18 кН.

При проведении расчетов силы сопротивления копанью стандартным ковшом экскаватора для грунта с теми же параметрами было получено значение силы сопротивления копанью равное 106.78 кН.

На основании того, что при работе боковым открьлком возникает дополнительный момент сил с плечом, равным максимальному вылету открьлка и половине ширины ковша экскаватора, был проведен расчет на прочность пальца шарнира рукоять-ковш, так как этот важный элемент первым из стандартных элементов экскаватора воспринимает изменившиеся в результате модернизации ковша нагрузки, расчет выполнялся из расчета значения силы сопротивления копанью боковым открьлком, равной 60 кН. Полученные в ходе расчетов значения изгибающего момента пальца шарнира рукоять-ковш 66 кНм не превысили значений изгибающего момента, возникающих при силе сопротивления копанью ковшом, равной 189 кН, указанной в технических характеристиках рассматриваемого базового экскаватора.

С целью проверки эффективности и экономической целесообразности применения предложенного технического решения был проведен расчет себестоимости выполнения работ по вскрытию участка протяженностью 10 м трубопровода Ду720 с глубиной залегания 2.5 м для выполнения работ по ремонту изоляции с применением СММ различными методами: с применением одного стандартного экскаватора (при выполнении расчетов в качестве примера был взят экскаватор UMG E330C) и выполнением подкопа трубопровода вручную; с применением одного стандартного экскаватора и одной подкопочной машины МП-720; с применением одного стандартного экскаватора с модернизированным ковшом.

При расчетно-балансовой стоимости экскаватора, равной 14824000 руб., дополнительная стоимость модернизации ковша и оборудования на основе отечественных компонентов в ходе проведенных расчетов составила 220655 руб. Расчетно-балансовая стоимость комплекта оборудования, состоящего из подкопочной машины МП-720 и передвижной дизельной электростанции АД 30-Т400 складывается из балансных стоимостей стоимости 2997500 руб. и 539550 руб.

В ходе проведенных расчетов были получены следующие значения общих затрат на эксплуатацию оборудования без учета затрат на перебазировку: стандартный экскаватор UMG E330C – 4293 руб/машино-час; экскаватор с модернизированным ковшом – 4323 руб/машино-час; комплект оборудования из МП-720 и АД 30-Т400 – 2201 руб/машино-час. Согласно открытым источникам, была принята средняя стоимость выполнения земляных работ вручную – 900 руб/м<sup>3</sup> (2000 руб/смена).

Согласно требованиям, предъявляемым к выполнению работ с применением СММ [6, 8], минимально достаточный профиль сечения ремонтного котлована трубопровода Ду720 с глубиной залегания 2.5 м (грунт: суглинок) представляет собой трапецию высотой 3.5 м, шириной по нижнему основанию 3.12 м и верхним основанием 8.4 м. Ввиду конструктивных особенностей рассматриваемого модернизированного ковша, за-

ключающихся в расположении нижнего края бокового открьлка на высоте 0.5 м выше зубьев основного ковша, при разработке боковых траншей необходимо выполнять перекоп 0.5 м, впоследствии заполняемый грунтом, удаленным вокруг трубопровода ручным методом и частично грунтом из-под трубопровода при подкопе.

Площадь сечения разрабатываемого грунта при подкопе – 0.896 м<sup>2</sup>, площадь сечения грунта вокруг трубопровода, подлежащая очистке ручным методом – 0.847 м<sup>2</sup>, площадь сечения разрабатываемого грунта экскаватором – 18.01 м<sup>2</sup>, площадь сечения перекопа грунта экскаватором с модернизированным ковшом – 1,2 м<sup>2</sup>, объем грунта при выполнении откосов на торцах траншеи при помощи экскаватора – 57.1 м<sup>3</sup>

Ввиду того, что объем земляных работ по очистке трубопровода ручным способом для всех рассматриваемых технологий является величиной неизменной, выполняется вручную и стоимость выполнения данных работ не зависит от выполненных модернизаций оборудования, при дальнейших расчетах данный показатель учитываться не будет.

Согласно техническим характеристикам, указанным заводами-изготовителями, выполненным расчетам для выполнения работ модернизированным ковшом и нормам затраты труда при выполнении земляных работ средняя производительность при работе в грунтах III категории (суглинки) составляет: экскаватор – 180 м<sup>3</sup>/ч; машина подкопная – 100 м/ч; экскаватор (в режиме подкopa модернизированным ковшом) – 49.62 м<sup>3</sup>/ч; землекоп – 0.526 м<sup>3</sup>/ч при сменной выработке 4.2 м<sup>3</sup>.

С целью учета возможной оптимизации загрузки привлекаемых землекопов в случае их неполного привлечения (согласно установленной сменной выработке) к выполнению работ по подкопу трубопровода считаем, что один из привлекаемых землекопов будет также задействован при выполнении земляных работ по очистке трубопровода ручным способом, и денежные средства, затраченные на него, считаем общими по объекту и не будем учитывать их в проводимом сравнении технологий выполнения работ.

Полученные в ходе проведенных расчетов себестоимости выполнения работ по вскрытию участка протяженностью 10 м трубопровода Ду720 с глубиной залегания 2.5 м для выполнения работ по ремонту изоляции с применением СММ занесены в Таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1.  
ДАННЫЕ ПО РАСЧЕТУ СЕБЕСТОИМОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Ду720 с глубиной залегания 2.5 м траншея – 10 м	Стандартный экскаватор (ручной подкоп)	Стандартный экскаватор (МП – 720)	Экскаватор с модернизированным ковшом
Разработка боковых траншей и выполнение откосов с учетом удаления грунта из траншеи после подкopa и перекопа для модернизированного ковша	1 ч 23 мин	1 ч 23 мин	1 ч 24 мин
	5939 руб.	5939 руб.	6052 руб.
Выполнение подкopa участка трубопровода	5 ч 40 мин (3 чел)	6 мин	11 мин
	2504 руб.	220 руб.	624 руб.
Суммарное время выполнения работ	7 ч 3 мин	1 ч 29 мин	1 ч 35 мин
Суммарная стоимость выполнения работ	8443 руб.	6159 руб.	6676 руб.
Средняя стоимость перебазировки, разгрузки и монтажа	11984 руб.	19984 руб.	11984 руб.
Суммарные затраты	20427 руб.	26143 руб.	18660 руб.

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью определения границ условий, при которых применение экскаватора с модернизированным ковшом является наиболее экономически целесообразным, были проведены расчеты и построены графические зависимости стоимости выполнения работ по вскрытию и подкопу участка трубопровода Ду720 и Ду530 в зависимости от протяженности данного участка рис. 7.

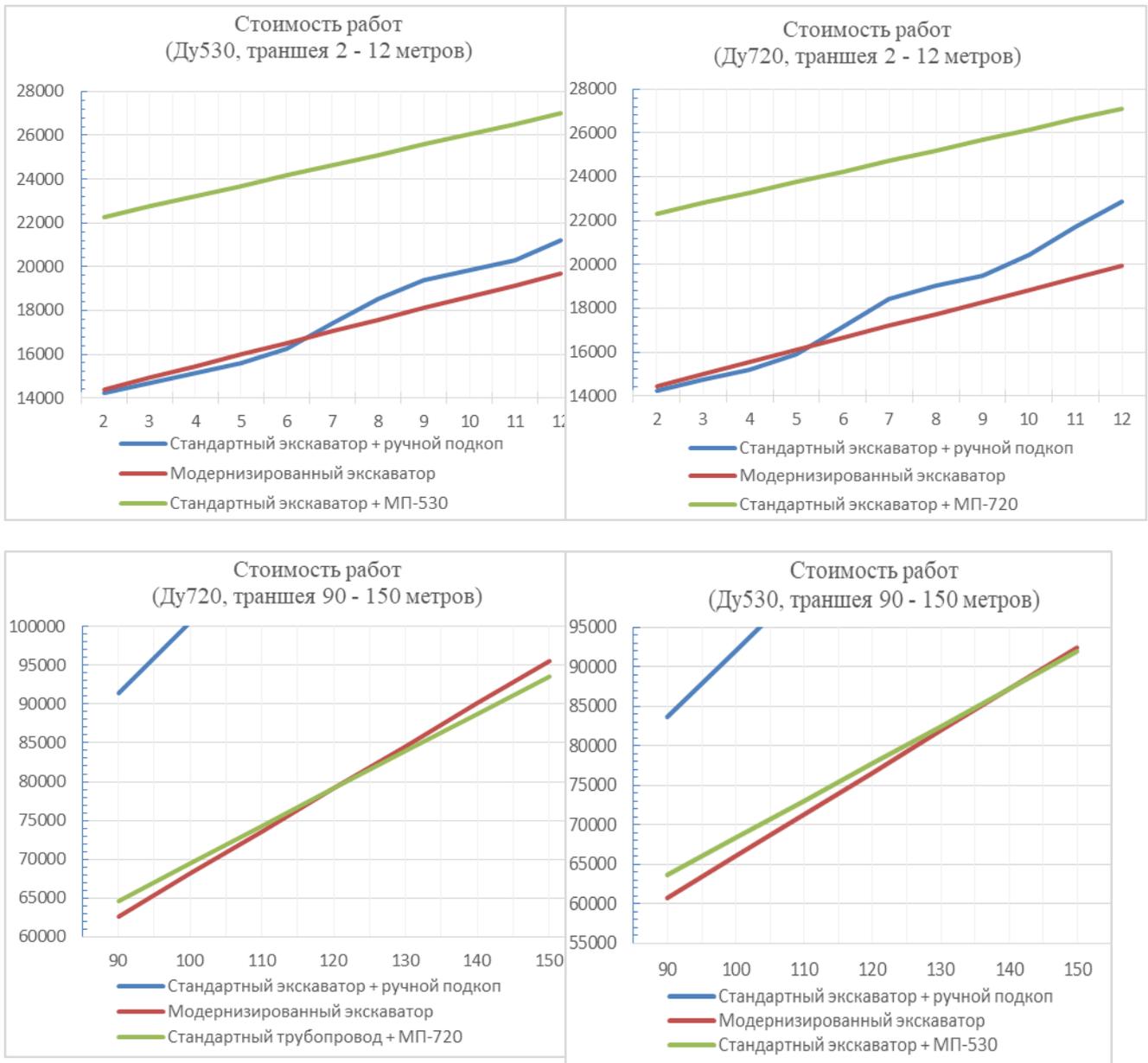


Рис. 7. Зависимости стоимости выполнения работ от диаметра и протяженности участка

На основании проведенных расчетов и полученных графических зависимостей видно, что рассматриваемая технология с применением экскаватора с модернизированным ковшом является наиболее экономически выгодной по отношению к существующим технологиям при выполнении работ по вскрытию участков протяженностью от 5.5 м до 120 м для трубопровода Ду720 и от 6.5 м до 140 м для трубопровода Ду530.

## V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

На основании данных, полученных в ходе расчетов себестоимости и времени выполнения работ и полученных графических зависимостей можно сделать вывод, что предложенное техническое решение является эффективным и экономически целесообразным.

Предложенное техническое решение обеспечивает снижение объемов выполнения земляных работ ручным способом при значительном сокращении суммарного времени выполнения этих работ по вскрытию участка трубопровода и позволяет также снизить себестоимость выполнения работ.

Рассмотренный модернизированный ковш одноковшового экскаватора является универсальным рабочим оборудованием и может применяться для выполнения как стандартных земляных работ, так и работ по выполнению подкопов без необходимости выполнения перерывов на дополнительные доработки.

#### 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. СТО Газпром 2-2.3-231-2008. Правила производства работ при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром». Введ. 2008-09-22 / разраб. «Оргэнергогаз». URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/58/58460/> (дата обращения: 09.10.2023).
3. СТО Газпром 2-2.1-413-2010. Схемы комплексной механизации капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов в различных природно-климатических условиях с учетом технико-экономических показателей. Введ. 01.02.2019 / разраб. ОАО «Газпром».
4. ОР-03.100.50-КТН-126-07. Регламент организации работ по реконструкции и капитальному ремонту объектов магистральных нефтепроводов с заменой и демонтажем труб, заменой изоляции, выборочным ремонтом. Отменен 29.07.2013, письмо № 06-03-12/5944 от 29.07.2013/ ОАО АК «Транснефть».
5. Низьев С. Г. Особенности и перспективы заводской изоляции труб и фасонных соединительных деталей трубопроводов // Территория Нефтегаз. 2008. № 3. С. 6–13.
6. РД-25.220.00-КТН-0077-21. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Антискоррозионная защита трубопроводов. Требования к организации и выполнению работ по ремонту и замене антикоррозионных покрытий.
7. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Введ. 01.07.2013. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103173> (дата обращения: 09.10.2023).
8. РД-23.040.00-КТН-064-18. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Вырезка и врезка катушек, соединительных деталей, запорной и регулирующей арматуры. Подключение участков магистральных трубопроводов. Требования к организации и выполнению работ.
9. Пат. 129949 Российская Федерация, МПК Е 02 F 3/40. Ковш подкопный одноковшового экскаватора / А. И. Демиденко, А. Ю. Турыбрин. № 2012143313/03 ; заявл. 09.10.2012 ; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19.
10. Домбровский Н. Г. Картвелишвили Ю. Л., Гальперин М. И. Строительные машины : в 2 ч. М. : Машиностроение, 1976. Ч. 1. 391 с.
11. Ветров Ю. А., Кархов А. А., Кондра А. С. [и др.] Машины для земляных работ / под ред. Ю. А. Ветрова. 2-е изд., дораб. и доп. Киев : Вища школа, 1981. 384 с.

## КОНТРОЛИРУЕМАЯ БИСТАБИЛЬНОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ИОННЫХ ЛОВУШКАХ

### CHARGED PARTICLES BISTABILITY CONTROL IN SURFACE ION TRAPS

Д. П. Щербинин, С. С. Рудый, В. В. Рыбин, А. В. Иванов

*Международный научно-образовательный центр Физики Наноструктур,  
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия*

D. P. Shcherbinin, S. S. Rudyi, V. V. Rybin, A. V. Ivanov

*IR&EC PhysNano, ITMO University, Saint-Petersburg, Russia*

**Аннотация.** В настоящей работе проводится численное моделирование динамики пористых заряженных микрочастиц, локализованных в поверхностной радиочастотной ловушке при атмосферных условиях и учете лазерного воздействия. Показана возможность перехода динамической системы от бистабильности к состояниям, характеризующимся как одной, так и тремя точками устойчивого равновесия. При этом количество точек устойчивого равновесия и их пространственное положение зависят от величин сил тяжести и оптического давления, действующих на локализованную частицу. Рассчитаны фазовые портреты движения частицы для каждого из рассмотренных случаев. Проводится обобщение полученных результатов и обсуждение их практического применения.

**Ключевые слова:** поверхностные ионные ловушки; левитомеханика; бистабильность; диссипативная динамика

**Abstract.** In the present work, we numerically simulate the dynamics of porous charged microparticles localized in surface radio-frequency trap under atmospheric conditions, taking into account laser irradiation. The dynamic system transition from bistability to states characterized by either one or three stable equilibrium points is revealed. The number of stable equilibrium points and their spatial position appear to depend on the magnitude of the particle gravity and optical pressure. The phase portraits of the particle trajectories are calculated for the each dynamic system state. The obtained results are generalized and discussed from a practical point of view.

**Keywords:** surface ion trap; levitomechanics; bistability; dissipative dynamics

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ионные ловушки являются универсальным инструментом для локализации, управления и исследования заряженных частиц. Пространственная локализация заряженных частиц происходит за счет их взаимодействия с электрическим полем ловушки. Существующие на сегодняшний день ловушки позволяют локализовывать и изучать заряженные частицы с размерами от атомарных ионов до микрочастиц. Ионные ловушки нашли широкое применение таких областях, как масс-спектрометрия [1], квантовые вычисления [2], исследование физических характеристик микрочастиц [3].

В зависимости от формы и расположения электродов радиочастотных ловушек, можно выделить три основных класса ловушек с точки зрения конструктивных особенностей: линейные [4], поверхностные [5] и трехмерные [6] ловушки. Ввиду простоты изготовления в лабораторных условиях поверхностные ловушки заслуживают особого внимания. Показано, что поверхностные ловушки могут быть изготовлены как с использованием металлических, так и полупроводниковых электродов заданной формы с помощью хорошо известных методов магнетронного распыления и фотолитографии [5, 7, 8].

В то же время форма и пространственное расположение электродов существенно влияют на конфигурацию электрического поля и, как следствие, на пространственное распределение потенциала. По этому признаку можно выделить ловушки с одной потенциальной ямой, а также ловушки, характеризующиеся множественными локальными потенциальными минимумами. Ранее было показано, что пространственное положе-

ние заряженных частиц в ловушках с двумя потенциальными ямами существенно зависит от соотношения заряда к массе заряженных частиц [9], что позволяет пространственно селективировать улавливаемые частицы. Была показана возможность одновременного улавливания частиц противоположных знаков с использованием ловушек, характеризующихся двумя потенциальными минимумами [10]. Ловушки с несколькими потенциальными ямами используются для фундаментальных исследований взаимодействия в многочастичных системах [11] и при формировании квази-кулоновских структур [12].

Необходимо отметить, что формирование нескольких потенциальных ям может быть связано не только с особенностями формы и условиями питания электродов ловушки, но и с влиянием сил неэлектрической природы на процессы локализации. Так, неоднородность эффективного потенциала, вызванная силой тяжести при локализации микрочастиц, приводила к формированию двух потенциальных минимумов и бистабильности динамической системы в работе [8]. При этом настоящий эффект может быть нивелирован с помощью дополнительного внешнего оптического воздействия.

В последнее время радиочастотные ловушки рассматриваются как перспективный инструмент для проведения спектральных исследований отдельных микро и наночастиц. Так, например, в работах была показана возможность измерения оптических спектральных свойств левитирующих заряженных частиц [13-15]. Перспективность использования радиочастотных ловушек для спектральных измерений одиночных объектов связана с возможностью прецизионного контроля пространственного положения одиночного локализованного объекта. Возможность такого контроля существенно упрощает юстировку измерительной схемы с учетом особенностей оптико-электронного оборудования. При этом необходимо отметить, что локализация объектов в радиочастотных ловушках возможна только при наличии нескомпенсированного заряда на поверхности локализуемого объекта, что может существенно сказаться на его измеряемых свойствах. В этом ключе использование пористых матриц как агента-доставщика, содержащего в своих порах исследуемые материалы, является перспективным направлением для проведения спектральных исследований с использованием радиочастотных ловушек. В то же время пористые матрицы являются нетривиальным объектом при проведении локализации в условиях атмосферного давления и возбуждающего оптического излучения, необходимого для проведения спектрально-оптических исследований.

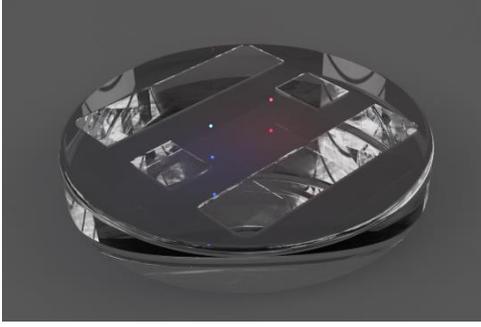
В настоящей работе проводится численное моделирование динамики пористых заряженных микрочастиц, локализованных в поверхностных прозрачных радиочастотных ловушках при атмосферном давлении и воздействии лазерного излучения. Показано, что под действием силы оптического давления динамическая система может переходить от бистабильности к состояниям, характеризующимся как одной, так и тремя точками устойчивого равновесия. Определена зависимость координат областей устойчивого равновесия в зависимости от плотности мощности лазерного излучения, размера и заряда частиц. Рассчитаны фазовые портреты траектории движения частицы для случая состояния динамической системы, характеризующейся одним, двумя и тремя положениями устойчивого равновесия, равно как и для случая дестабилизации локализации. Проводится обобщение полученных результатов.

## II. ПРИНЦИПЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОРИСТЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ПОВЕРХНОСТНЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЛОВУШКАХ

В работе численно исследуются процессы локализации пористых одиночных микрочастиц в поверхностной радиочастотной ловушке. В первой части работы проводится численный расчет для пористых сферических частиц  $\text{CaCO}_3$  с размером 4 мкм. Предлагаемая геометрия поверхностной ловушки состоит из 4 прямоугольных электродов (рис. 1) и является модификацией известной 5-wire схемы [16]. В отличие от классической 5-wire схемы, предлагаемая геометрия электродов обеспечивает устойчивую контролируемую локализацию заряженных частиц по всем степеням свободы.

При моделировании учитывалось электростатическое взаимодействие заряженной частицы с полем ловушки, сила тяжести частицы (направлены вдоль оси  $z$ ), силы вязкого трения и сила оптического давления со стороны возбуждающего излучения. Для моделирования принималось, что лазерное излучение направлено вдоль оси  $z$ . При использовании поверхностных ловушек, такая геометрия фотовозбуждения возможна в случае полностью прозрачных ловушек. Полностью прозрачные поверхностные ловушки могут быть выполнены с использованием стеклянных подложек с напыленными электродами оксида индия олова, как было продемонстрировано в работе [8].

а



б

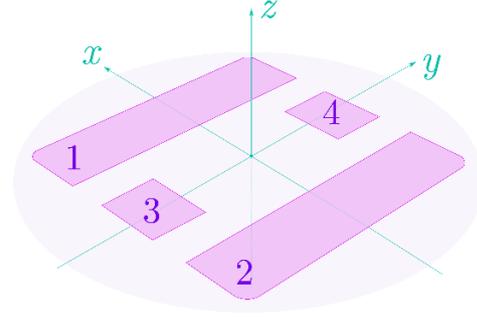


Рис. 1. Модель плоской поверхностной ловушки, (а) – трёхмерная модель, положения локализованных частиц – синей и красной точками. (б) – принципиальная схема с обозначением индекса электродов.

Электроды ловушки выделены розовым

Для описания сил взаимодействия заряженной частицы с полем поверхностной ловушки необходимо задать пространственное распределение электрического потенциала. Распределение потенциала  $U$  вокруг изолированного одиночного прямоугольного электрода можно описать решением уравнения Лапласа для полупространства ( $z > 0$ ) в виде [17]

$$U(x, y, z, x_1, x_2, y_1, y_2) = \frac{V_0}{\pi} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{(x_1-x)(y_1-y)}{z\sqrt{(x_1-x)^2 + (y_1-y)^2 + z^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{(x_1-x)(y_2-y)}{z\sqrt{(x_1-x)^2 + (y_2-y)^2 + z^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{(x_2-x)(y_1-y)}{z\sqrt{(x_2-x)^2 + (y_1-y)^2 + z^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{(x_2-x)(y_2-y)}{z\sqrt{(x_2-x)^2 + (y_2-y)^2 + z^2}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $V_0$  – напряжение на прямоугольном электроде,  $x_1, x_2, y_1, y_2$  – диагональные вершины прямоугольника. В геометрии, состоящей из нескольких прямоугольных электродов, может быть применен принцип суперпозиции. При синфазном питании электродов с амплитудой  $V$  и частотой  $\omega$ , результирующее распределение электрического потенциала  $U_T$  вокруг электродов ловушки, может быть записано как

$$U_T(x, y, z) = V \cos(\omega t) U_{T0}(x, y, z) = V \cos(\omega t) \sum_{i=1}^4 U(x, y, z, x_{1i}, x_{2i}, y_{1i}, y_{2i}), \quad (2)$$

где  $i$  – инкремент, координаты электродов ловушки сведены в Таблицу 1. В таком случае сила электростатического взаимодействия  $F_T$  по обобщенной координате  $Q$  принимает вид

$$F_T(Q) = -e \frac{\partial U_T(x, y, z)}{\partial Q}, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд частицы. В случае локализации пористых микрочастиц в ловушке сила вязкого трения  $F_D$  принимает вид [18]

$$F_D(Q) = -6\pi\mu r \dot{Q} \left( 1 + \frac{k'}{2r^2} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус объекта локализации,  $\mu$  – динамическая вязкость среды,  $k'$  – проницаемость объекта локализации.

Хорошо известно, что в случае фрактально структурированных объектов сила светового давления может существенно отличаться от случая взаимодействия со сплошными средами [19]. В данной работе мы предлагаем обобщить формализм описания светового давления на фрактально-структурированные объекты и для случая пористыми средами. Таким образом, сила светового давления лазерного излучения  $F_{OP}$ , направленного вдоль оси  $oz$  может быть записана в виде

$$F_{OP} = 3.33D_f \cdot 10^{-9} P \frac{4r^2}{4r_n^2} Q_{pr} = 3.33D_f \cdot 10^{-9} S\pi r^2 Q_{pr}, \quad (5)$$

где  $P$  – мощность лазерного излучателя,  $r_0$  – радиус лазерного пучка в перетяжке,  $Q_{pr}$  – эффективность силы светового давления, связанная с эффективностью рассеяния Ми на объекте локализации,  $S$  – плотность мощности лазерного излучения,  $D_f$  – коэффициент эффективности силы светового давления, связанный с фрак-

тальной размерностью объекта локализации. Учитывая все вышесказанное, уравнения движения локализованной частицы с учётом силы тяжести могут быть записаны как

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -e \frac{\partial U_T(x,y,z)}{\partial x} - 6\pi\mu r \dot{x} \left(1 + \frac{k'}{2r^2}\right)^{-1}, \quad m\ddot{y} = -e \frac{\partial U_T(x,y,z)}{\partial y} - 6\pi\mu r \dot{y} \left(1 + \frac{k'}{2r^2}\right)^{-1}, \\ m\ddot{z} &= -e \frac{\partial U_T(x,y,z)}{\partial z} - 6\pi\mu r \dot{z} \left(1 + \frac{k'}{2r^2}\right)^{-1} + 3.33D_f \cdot 10^{-9} S\pi r^2 Q_{pr} - mg, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $m$  – масса локализованной частицы,  $g$  – ускорение свободного падения.

Во второй части работы будет проведено обобщение исследуемых динамических систем. Для удобства обобщенного рассмотрения, уравнения (6) необходимо переписать в безразмерных величинах как

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -2q \cos(2\tau) \frac{\partial U_{TQ}(x,y,z)}{\partial x} - \gamma \dot{x}, \quad m\ddot{y} = -2q \cos(2\tau) \frac{\partial U_{TQ}(x,y,z)}{\partial y} - \gamma \dot{y}, \\ \ddot{z} &= -2q \frac{\partial U_{TQ}(x,y,z)}{\partial z} - \gamma \dot{z} - \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

где введена нормировка координат  $Q \rightarrow Q/a$  на ширину электрода  $a$ , введено безразмерное время  $\tau = \omega t/2$  и замены  $q = 2eV/(ma^2\omega^2)$ ,  $\gamma = 12\pi\mu r \left(1 + \frac{k'}{2r^2}\right)^{-1}/(ma\omega)$ ,  $\alpha = 4(mg - 3.33D_f \cdot 10^{-9} S\pi r^2 Q_{pr})/(ma\omega^2)$ .

ТАБЛИЦА 1  
КООРДИНАТЫ ДИАГОНАЛЬНЫХ ВЕРШИН ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ЛОВУШКИ

Индекс электрода	X <sub>1</sub> , мм	X <sub>2</sub> , мм	Y <sub>1</sub> , мм	Y <sub>2</sub> , мм
1	0	6	0	30
2	18	24	0	30
3	9	15	0	6
4	9	15	24	30

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При анализе динамики заряженного объекта в ловушке принципиально важным является определение количества точек устойчивого равновесия, равно как и их пространственного положения. Точки устойчивого равновесия могут быть определены численным решением задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (6) при заданных начальных условиях. Начальные условия задавались с учетом особенностей геометрии ловушки, представленной на рис. 1. Считалось, что начальные координаты  $x$  и  $y$  соответствуют средней точке ловушки, начальная координата по оси  $z$  находится на расстоянии, соответствующем 7.2 мм от поверхности ловушки. Начальные скорости по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  задавались случайно в рамках распределения  $\dot{x}(0) \in [-0.1..0.1]$  м/с,  $\dot{y}(0) \in [-0.1..0.1]$  м/с,  $\dot{z}(0) \in [-0.4..0]$  м/с, соответственно. Решение осуществлялось с помощью метода Рунге-Куты 4-го порядка с постоянным шагом интегрирования. При моделировании частота переменного напряжения принималась равной  $\omega = 750$  Гц, амплитуда переменного напряжения  $V = 600$  В, средняя плотность пористых частиц  $255 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость воздуха  $\mu = 1.8 \cdot 10^{-6}$  Па с, радиус частицы 2 мкм, заряд  $10^3$  элементарных зарядов, проницаемость  $k' = 9.4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ , коэффициенты эффективности светового давления  $Q_{pr} = 1.16$ ,  $D_f = 3$ .

Положение точек устойчивого равновесия в плоскости  $YZ$  в зависимости от направления и плотности мощности лазерного излучения представлено на рис. 2. Положение точек устойчивого равновесия пористых сфер  $\text{CaCO}_3$  с указанными выше параметрами показано двумя черными точками. Видно, что такая динамическая система характеризуется бистабильностью. С точки зрения юстировки оптических схем, бистабильность

положения локализованной частицы является негативным эффектом. В то же время может наблюдаться переход от бистабильности к состоянию системы с единственным устойчивым положением равновесия при воздействии на пористую структуру лазерного излучения, что подтверждается результатами численного расчета. Действительно, при воздействии лазерного излучения с направлением, противоположным ускорению свободного падения, сила светового давления может частично или полностью компенсировать силу тяжести частицы.

В случае частичной компенсации (плотность мощности лазерного излучения  $0 \dots 31 \text{ Вт/см}^2$  для рассматриваемой системы), наблюдается сближение областей устойчивой локализации и рост высоты над поверхностью электродов ловушки. При плотности мощности  $31 \text{ Вт/см}^2$  происходит переход к состоянию с единственным положением равновесия над геометрическим центром ловушки. Последующее увеличение плотности мощности (до  $42 \text{ Вт/см}^2$ ) приводило к дальнейшему росту высоты положения точки устойчивого равновесия до  $8.64 \text{ мм}$ . При плотности мощности выше  $42 \text{ Вт/см}^2$  наблюдалась дестабилизация локализации частицы.

Вместе с тем в случае, когда лазерный луч сонаправлен с ускорением свободного падения, увеличение плотности мощности также может приводить к состоянию с одним устойчивым положением равновесия. Для данной системы увеличение плотности мощности до  $43 \text{ Вт/см}^2$  было сопряжено с уменьшением высоты обеих точек равновесия, при этом бистабильность сохранялась. При плотности мощности в диапазоне  $43 \dots 52 \text{ Вт/см}^2$  система характеризовалась тремя точками равновесия. Для более наглядной демонстрации на рис. 2 б представлены зависимости координаты  $y$  положений устойчивого равновесия от плотности мощности лазерного излучения и его направления. Увеличение плотности мощности до  $115 \text{ Вт/см}^2$  приводило систему к состоянию с одним устойчивым положением равновесия. Дальнейшее увеличение плотности мощности приводило к дестабилизации локализации. Наблюдаемое изменение количества и положения точек устойчивого равновесия может быть объяснено деформацией обобщенного (эффективного) потенциала с учетом сил неэлектрической природы действующей в системе.

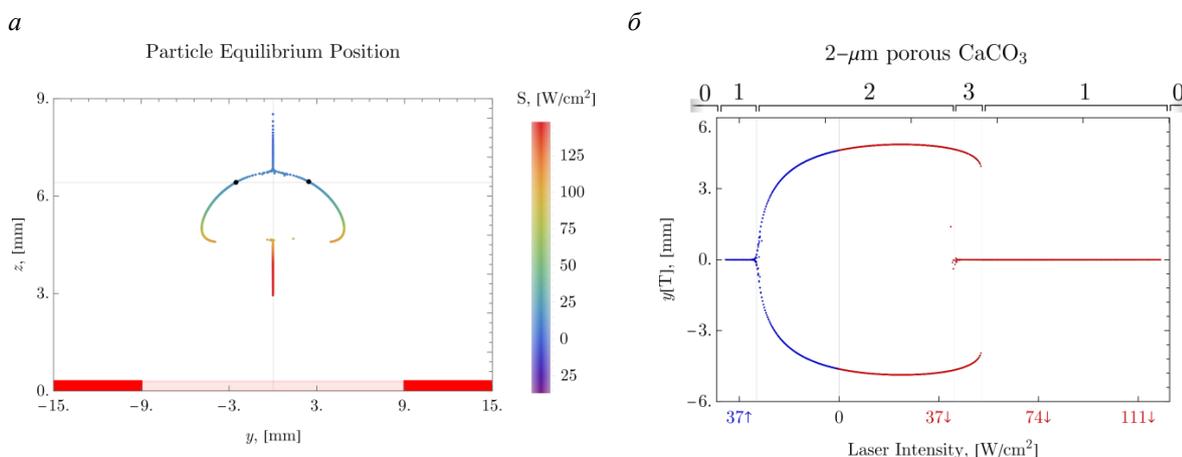


Рис. 2. а – зависимость положения локализованной частицы в плоскости  $Y\text{O}Z$  от плотности мощности лазерного излучения, б – диаграмма динамических режимов

На рис. 3 представлены фазовые портреты траектории исследуемой частицы для случаев дестабилизации локализации (а), единственного положения равновесия (б), бистабильной (в) и случая с тремя положениями равновесия (г). Фазовые портреты траекторий движения были рассчитаны в соответствии с системой дифференциальных уравнений (6). Цветами отмечены различные траектории, соответствующие различным начальным условиям. Необходимо отметить, что для всех точек устойчивого равновесия (рис. 2), траектории на фазовых портретах соответствуют аттракторам – предельным циклам (рис. 3 б-г).

Исследованные эффекты не являются уникальными для рассмотренных выше параметров. Обобщенное рассмотрение переходов состояний динамической системы (режимов локализации) может быть выполнено при решении системы дифференциальных уравнений (7) в безразмерных параметрах и координатах.

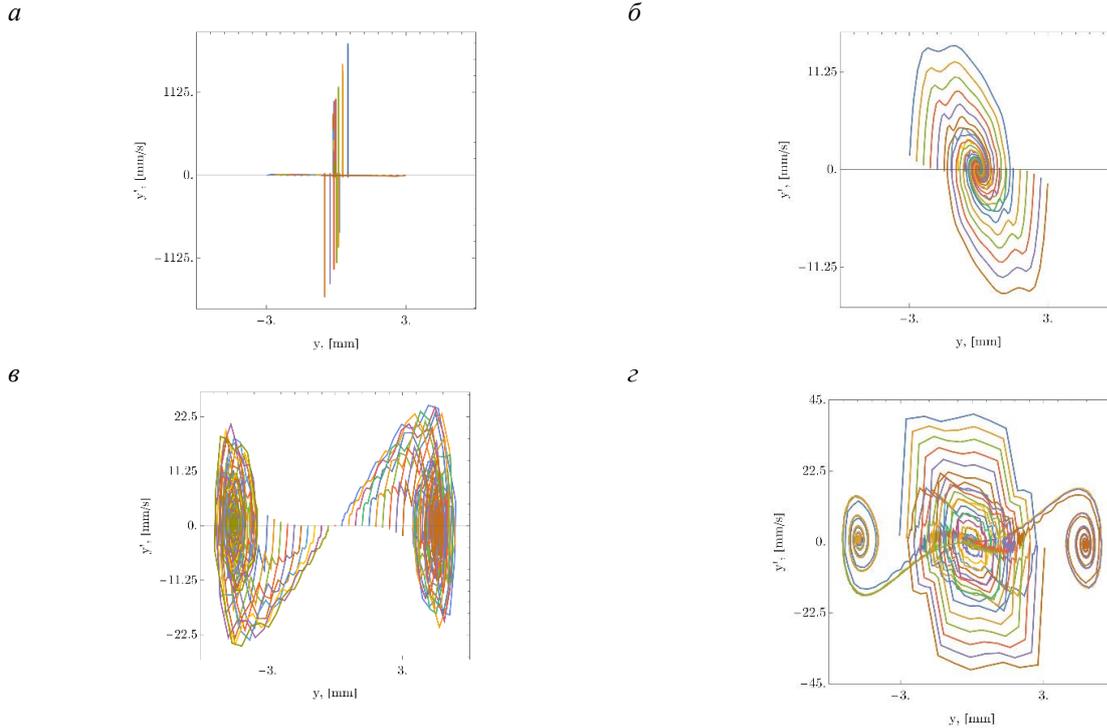


Рис. 3. Фазовые портреты траектории движения частиц в случае дестабилизации локализации (а) а также локализации с одной (б), двумя (в) и тремя (г) точками устойчивого равновесия

На рис. 4 представлена диаграмма динамических режимов в плоскости параметров  $q$ - $\alpha$ , где  $q$  – характеризует поле ловушки,  $\alpha$  – характеризует деформацию обобщенного (эффективного) потенциала. Зеленым точкам соответствуют области с единственным устойчивым положением равновесия. Синим отмечены области с двумя положениями равновесия. Красным ограничен регион с реализацией трёх положений равновесия. При пренебрежимо малой силе тяжести и отсутствии силы светового давления деформация обобщенного (эффективного) потенциала отсутствует и система характеризуется единственным положением равновесия. В противном случае может наблюдаться формирование нескольких положений устойчивого равновесия (по аналогии со случаем на рис. 2), что необходимо учитывать при локализации массивных частиц и наличии внешних воздействий.

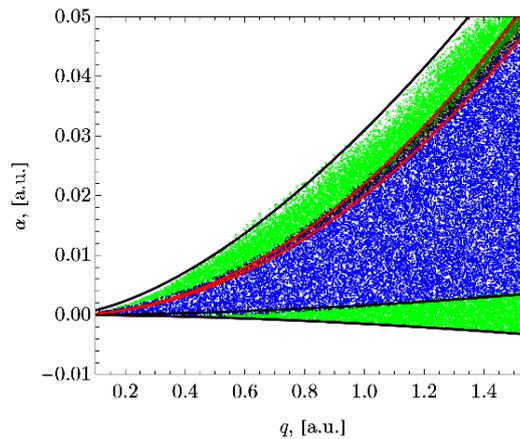


Рис. 4. Диаграмма динамических режимов

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены особенности процессов локализации пористых микроструктур в поверхностных радиочастотных ловушках. Рассматривается влияние силы тяжести и силы светового давления на динамику микрочастиц в ловушке при локализации в условиях атмосферного давления. Показано, что при локализации массивных объектов наблюдается деформация эффективного потенциала и реализация биста-

бильности в рассматриваемой динамической системе. В работе предложен оптический метод компенсации бистабильности с помощью лазерного излучения. Показано, что в зависимости от направления и плотности мощности лазерного излучения может наблюдаться переход динамической системы в состояние с одним или двумя положениями равновесия, равно как и полной дестабилизации. Определены условия реализации различных динамических режимов в зависимости от плотности мощности лазерного излучения на примере пористых структур CaCO<sub>3</sub> размером 4 мкм. Произведено обобщение полученных результатов.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 22-42-05002.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nolting D., Malek R., Makarov A. Ion traps in modern mass spectrometry // *Mass spectrometry reviews*. 2019. Vol. 38. P. 150–168. DOI: 10.1002/mas.21549.
2. Nop G. N., Paudyal D., Smith J. D. H. Ytterbium ion trap quantum computing: The current state-of-the-art // *AVS Quantum Science*. 2021. Vol. 3, no. 4. P. 044101-1–044101-17. DOI:10.1116/5.0065951.
3. Bell D. M., Howder C. R., Johnson R. C. [et al.] Single CdSe/ZnS nanocrystals in an ion trap: charge and mass determination and photophysics evolution with changing mass, charge, and temperature // *ACS Nano*. 2014. Vol. 8, no. 3. P. 2387–2398. DOI: 10.1021/nn405920k.
4. Drewsen M., Broner A. Harmonic linear Paul trap: Stability diagram and effective potentials // *Physical Review A*. 2000. Vol. 62. P. 04540-1–04540-4. DOI: 10.1103/PhysRevA.62.045401.
5. Seidelin S., Chiaverini J., Reichle R. [et al.] Microfabricated surface-electrode ion trap for scalable quantum information processing // *Physical review letters*. 2006. Vol. 96, no. 25. P. 253003-1–253003-4. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.253003.
6. Joshi M. K., Satyajit K. T., Rao P. M. Influence of a geometrical perturbation on the ion dynamics in a 3D Paul trap // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2015. Vol. 800, no. 18. P. 111–118. DOI:10.1016/j.nima.2015.07.046.
7. Daniilidis N., Narayanan S., Moeller S. [et al.] Fabrication and heating rate study of microscopic surface electrode ion traps // *New Journal of Physics*. 2011. Vol. 13, no. 1. P. 013032-1–013032-17. DOI:10.1088/1367-2630/13/1/013032.
8. Shcherbinin D., Rybin V. V., Rudyi S. S. [et al.] Charged Hybrid Microstructures in Transparent Thin-Film ITO Traps: Localization and Optical Control // *Surfaces*. 2023. Vol. 6, no. 2. P. 133–144. DOI: 10.3390/surfaces6020010.
9. Kokorina O. O., Rybin V. V., Rudyi S. S. [et al.] Double-well effective potential in a linear Paul trap with end-cap electrodes // *Quantum Nanophotonic Materials, Devices, and Systems*. San Diego, California. 2021. Vol. 11806. P. 55–60. DOI: 10.1117/12.2593715.
10. Malek R., Wanczek K. P. Trapping and excitation of ions in a double well potential // *Rapid communications in mass spectrometry*. 1997. Vol. 11, no. 14. P. 1616–1618.
11. Tanaka U., Nakamura M., Bautista-Salvador A. [et al.] Creation of double-well potentials in a surface-electrode trap towards a nanofriction model emulator // *Quantum Science and Technology*. 2021. Vol. 6, no. 2. P. 024010-1–024010-9. DOI: 10.1088/2058-9565/abe51a.
12. Rudyi S. S., Romanova A., Rozhdestvensky Y. [et al.] Hysteresis-like phase transitions in quadrupole traps // *Modern Physics Letters A*. 2022. Vol. 37, no. 23. P. 2250151-1–2250151-6. DOI: 10.1142/S0217732322501516.
13. Rybin V. V., Shcherbinin D. P., Rudyi S. S. [et al.] Photoluminescence of quantum dot cluster in quadrupole Paul trap // *SPIE Future Sensing Technologies*. Yokohama, Japan, 2023. Vol. 12327. P. 339–342. DOI: 10.1117/12.2666321.
14. Howder C. R., Long B. A., Bell D. M. [et al.] Photoluminescence of charged CdSe/ZnS quantum dots in the gas phase: effects of charge and heating on absorption and emission probabilities // *ACS Nano*. 2014. Vol. 8, no. 12. P. 12534–12548. DOI: 10.1021/nn505374d.
15. Shopa I., Kolwas M., Kamińska I. [et al.] Luminescent nanoparticles in a shrinking spherical cavity—probing the evaporating microdroplets of colloidal suspension—optical lattices and structural transitions // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022. P. 108439-1–108439-17. DOI: 10.48550/arXiv.2211.12925.
16. House M. G. Analytic model for electrostatic fields in surface-electrode ion traps // *Physical Review A*. 2008. Vol. 78. P. 033402-1–033402-8. DOI: 10.1103/PhysRevA.78.033402.
17. Lechner K. *Classical electrodynamics : A Modern Perspective*. Springer International Publishing, 2018. 688 p. ISBN 978-3-030-06301-6.
18. Singh M. P., Gupta J. L. The effect of permeability on the drag of a porous sphere in a uniform stream // *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1971. Vol. 51, no. 1. P. 27–32.
19. Mukai T., Ishimoto H., Kozasa T. [et al.] Radiation pressure forces of fluffy porous grains // *Astronomy and Astrophysics*. 1992. Vol. 262. P. 315–320.

## ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ

УДК 621:311

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-44-48

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ ДОМОХОЗЯЙСТВ

### STUDY OF INFLUENCING FACTORS ON THE HOUSEHOLD POWER CONSUMPTION

Е. Г. Андреева, Ю. А. Кладко

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

E. G. Andreeva, Julia A. Kladko

*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы электропотребления домохозяйств в зависимости от технических (состав бытовых электроприемников, время года) и социально-экономических (тип и структура домохозяйства, состав семьи, возраст, социальное положение) факторов. На основе анализа построенных в различное время года графиков нагрузки можно строить модели прогноза электропотребления домохозяйств различного типа.

**Ключевые слова:** домохозяйство, электропотребление, электроэнергия, электроприемник, график нагрузки, факторы.

**Abstract.** The paper examines issues for household electricity consumption depending on technical (composition of household electrical receivers, time of year) and socio-economic (type and structure for household, family composition, age, social status) factors. Based on the analysis of load graphs constructed at different times of the year, it is possible to build forecast models for the electricity consumption for households the various types

**Keywords:** household, electricity consumption, electricity, electric receiver, load schedule, factors.

#### I. ВВЕДЕНИЕ

Модели прогноза электропотребления домохозяйств могут строиться на моделях потребления электроэнергии домохозяйством на основе построения суточных графиков нагрузки домохозяйства, где в первую очередь необходимо учитывать состав бытовых приборов (электроприемников), что позволяет учесть изменение образа жизни населения и получить рекомендации по экономии электропотребления.

При проведении таких исследований можно группировать потребителей, например, по типу жилья (многоэтажное, индивидуальные коттеджи, сельские дома и прочее) [1]. Объем потребления электроэнергии зависит от времени года и средние показания электросчетчика возрастут в результате перехода с «летнего» на «зимнее» время.

#### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. АНАЛИЗ СУММАРНОЙ НАГРУЗКИ ДОМОХОЗЯЙСТВА

Проводится аналитический расчет на примере домохозяйств садового некоммерческого товарищества (СНТ), которое состоит из трех домов. Частные жилые дома можно строить на участках под индивидуальное жилищное строительство, под личное подсобное хозяйство и на садовых участках. Они могут находиться за пределами населенных пунктов, но строительство там все-таки разрешено.

Электрическая нагрузка домохозяйства зависит от многих факторов: времени года, длительности светового дня, длительности использования приемников, количества проживающих человек [2, 3].

Расчетная мощность электроприемников (ЭП) домохозяйства  $P_p$ , кВт, определяется по методу коэффициента спроса и вычисляется по формуле:

$$P_p = \sum P_{ном i} K_{с i}, \quad (1)$$

где,  $P_{ном i}$  – номинальная мощность  $i$ -го ЭП квартиры, кВт;  $K_{с i}$  – коэффициент спроса  $i$ -го ЭП квартиры.

Расчетный ток линии  $I_p$ , А, вычисляется с учетом (1):

$$I_p = \frac{P_p}{U_{ном} \cos \varphi}, \quad (2)$$

где,  $U_{ном}$  – номинальное напряжение питающей сети, кВ;  $\cos \varphi$  – средневзвешенный коэффициент мощности ЭП домохозяйства. Как правило, значение средневзвешенного коэффициента мощности  $\cos \varphi_{ср}$  составляет 0.95.

Ниже (табл. 1) приводится имеющийся состав электроприемников в трех исследуемых квартирах. Площадь квартир составляет: 88.3 м<sup>2</sup>, 58 м<sup>2</sup>, 36 м<sup>2</sup>. Категория надежности электроснабжения – третья. Система заземления TN – C – S. В домохозяйствах установлены светодиодные лампы GU5.3.

Немаловажную роль на показания потребления электроэнергии оказывает количество проживающих человек в каждой квартире. В первом домохозяйстве проживают 2 человека, во втором – 5 человек, а в третьем – 2 человека.

Были произведены замеры электроэнергии по показаниям электросчетчиков в летне-осенний период. На основании данных показаний были построены суточные графики потребления электроэнергии.

ТАБЛИЦА 1  
СОСТАВ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ДОМОХОЗЯЙСТВ

№ п/п	Домохозяйство № 1 (общая площадь 88.3 м <sup>2</sup> )	Номиналь- ная мощ- ность ЭП, Вт	Домохозяйство № 2 (общая площадь 58 м <sup>2</sup> )	Номинальная мощность ЭП, Вт	Домохозяйство № 3 (общая площадь 36 м <sup>2</sup> )	Номинальная мощность ЭП, Вт
1	Электрическая лам- почка (204 шт.)	5.5	Электрическая лам- почка (84 шт.)	5.5	Электрическая лам- почка (36 шт.)	5.5
2	Телевизор	100	Телевизор	900	Телевизор	100
3	Ноутбук	80	Холодильник	210	Холодильник	250
4	Холодильник	250	Электроплита	1200	Микроволновка	550
5	Духовой шкаф	3500	Микроволновка	700	Чайник	900
6	Электрогриль	2000	Водонагреватель	2000	Насос	1000
7	Электроплита	800	Насос	1500	Утюг	500
8	Миксер	500	Пылесос	120	Пылесос	80
9	Тостер	700	Чайник	100	Зарядное устройство	15
10	Стиральная машина	1200	Зарядное устройство	20	Стиральная машина	1000
11	Утюг	1000	Стиральная машина	750		
12	Пылесос	200	Ноутбук	75		
13	Фен	800				
14	Зарядное устрой- ство	15				
15	Электрокотел	7500				
16	Насос	1500				
17	Водонагреватель	2000				
18	Посудомоечная машина	1200				
19	Игровая приставка	2000				

По выражениям (1, 2) суммарная нагрузка домохозяйства № 1 составила  $P_p = 17.08$  кВт, расчетный ток линии  $I_p = 70.55$  А; домохозяйства № 2 составила  $P_p = 5.42$  кВт, расчетный ток линии  $I_p = 22.39$  А; домохозяйства № 3 составила  $P_p = 1.37$  кВт, расчетный ток линии  $I_p = 5.61$  А.

### III. ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ ДОМОХОЗЯЙСТВАМИ. ГРАФИКИ НАГРУЗОК

Опытным путем производилось снятие показаний электросчетчиков в исследуемых трех домохозяйствах с июня 2022 по ноябрь 2022 года.

В первом домохозяйстве проживает молодая работающая пара, общая площадь дома которых составляет  $88.3 \text{ м}^2$ . В домохозяйстве имеется состав электроприемников, приведенный в табл. 1. Распорядок дня в домохозяйстве следующий. Первый подъем и приготовление завтрака в домохозяйстве происходит с 5-00 до 6-00. С 7-00 до 9-00 завтраком и сборами на работу занимается второй жилец дома. После приезда первого с работы в промежуток времени с 15-00 до 16-00 растут расходы электроэнергии на приготовление пищи, уборку дома, а также на благоустройство придомовой территории. В период с 21-00 до 24-00 в домохозяйстве увеличивается потребление электроэнергии на следующие нужды: подогревание пищи (ужин), принятие душа (работа бойлера и скважинного насоса), запуск стирки. Цикл мойки посудомоечной машины по отсрочке происходит в ночное время 2-00 до 5-00. Исходя из данного распорядка дня, суточные графики нагрузки летом и осенью для домохозяйства № 1 выглядят следующим образом (рис. 1).

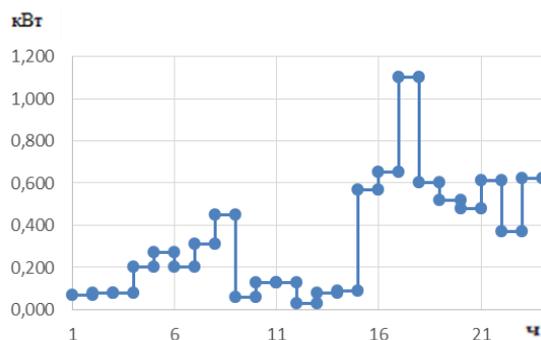


Рис. 1. Суточный график нагрузки домохозяйства № 1 (1 июня)

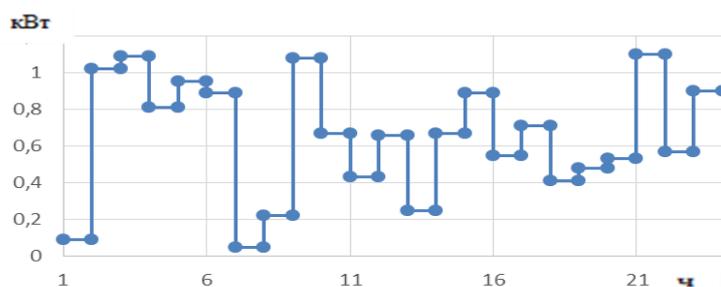


Рис. 2. Суточный график нагрузки домохозяйства № 1 (1 ноября)

При сравнении суточных графиков нагрузки первого дома за июнь и ноябрь видно, что потребление электроэнергии в ноябре значительно выше, так как с наступлением холодов увеличилось потребление электроэнергии электродкотлом для поддержания тепла в доме в течение суток.

Во втором доме проживает семья, состоящая из 4 человек. Это родители и два несовершеннолетних ребенка. В табл. 1 представлен перечень бытовых приборов, используемых данной семьей.

Распорядок дня представляется следующим образом. Пробуждение и сбор на работу с 6-00 до 7-00 главы семейства. Подъем всех остальных членов семьи начинается с 9-00. Приготовление завтрака, сбор старшего ребенка и младшего ребенка в школу, летний лагерь, секционные кружки, детский садик и т.д. Также до прогулки в вечернее время младшего ребенка происходит приготовление еды, уборка дома, благоустройство придомовой территории. С 17-00 до 19-00 в связи с отсутствием в доме людей потребление электрической энергии происходит за счет включенного кондиционера для поддержания в доме благоприятной температу-

ры, а также работы бытовой техники, которую можно отсрочить как в ночное время, так и во время отсутствия в доме домочадцев. С 19-00 до 24-00 во втором доме потребление электроэнергии в большой мере выражены следующими бытовыми приборами: микроволновая печь, бойлер, электрическая плита, кондиционер.

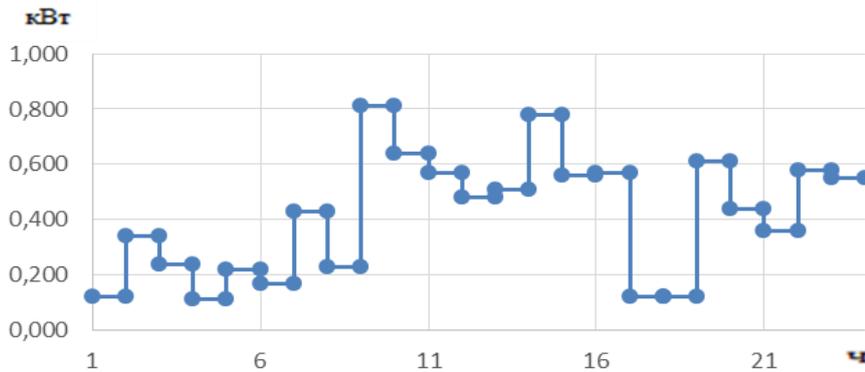


Рис. 3. Суточный график нагрузки домохозяйства № 2 (1 июня)

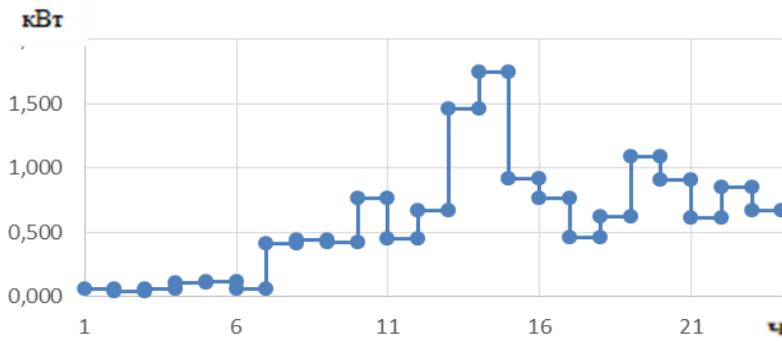


Рис. 4. Суточный график нагрузки домохозяйства № 2 (1 ноября)

Сравнивая графики, можно отметить, что потребление в дневное время электроэнергии в ноябре выше, чем в июне. Это объясняется использованием такими приборами как электрообогреватель, бойлер для поддержания комфортной температуры в доме.

В третьем домохозяйстве проживает супружеская пара пенсионного возраста. Перечень бытовых электроприемников представлен в табл. 1.

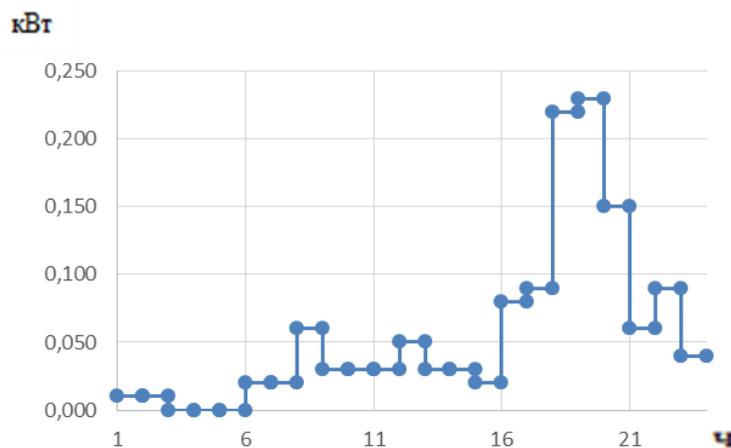


Рис. 5. Суточный расход электроэнергии (1 июня)

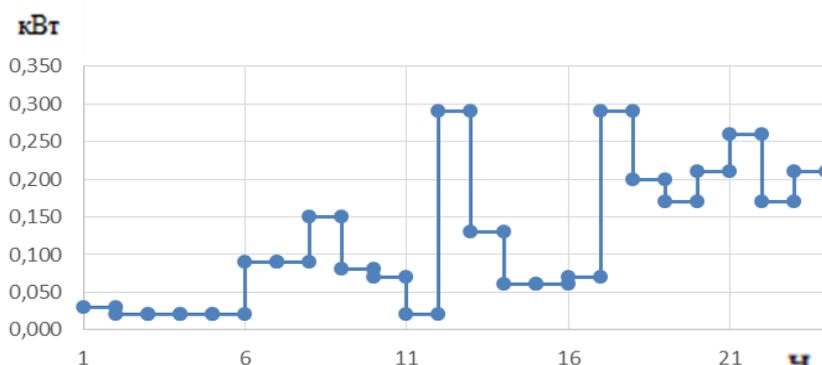


Рис. 6. Суточный расход электроэнергии (1 ноября)

На протяжении дня в летнее время потребление электрической энергии минимально в связи с наличием огородных работ на придомовых участках (рис. 5 и рис.6). Потребление электроэнергии в холодное время увеличивается только за счет включения нагревательных приборов.

#### IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные аналитические исследования показали, что потребление энергии домохозяйствами зависит от многих факторов. Суточный график загрузки позволяет точно учитывать периоды, когда уровень спроса увеличивается и уменьшается. На это большое влияние оказывает продолжительность дня и ночи: зимой день короче, а ночь длиннее, а осенью день длиннее, а ночь короче. Показано, что зимой потребление энергии увеличивается. Это связано с дополнительным подключением электроприемников типа обогревателей, бойлеров.

Основными влияющими факторами являются: изменения факторов спроса, количества и конфигурации, а также режимов работы электроприемников, количества солнечных часов и количества жильцов. Эти факторы являются техническими. Экономические факторы – тарифное ценообразование в зависимости от места жительства человека (область, район, город, село), типа домохозяйства.

Экспериментальным путем были сняты показания счетчиков электроэнергии (ежедневно, ежемесячно) в трех домохозяйствах. Измерения проводились с осени по зиму. Из полученных данных видно, что потребление электроэнергии зимой увеличивается примерно в 1.5 раза. Увеличение потребления электрической энергии в холодное время года обосновывается увеличением нагрузки таких бытовых приборов, как обогреватели, электрокотлы, бойлеры и прочее.

Ежедневное потребление энергии показывает часы максимальной и минимальной нагрузки.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что возможным решением проблемы экономии электропотребления является использование системы умный дом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенюк Г. Г. Оптимизация энергопотребления домохозяйства на основе прогноза графика максимальной нагрузки бытовых приборов // Управление большими системами. 2017. № 69. С. 50–75. URL: <https://www.mathnet.ru/links/40c4fabdd7f889b411f312eee236b1de/ubs930.pdf> (дата обращения: 12.10.2023).
2. Сенчук Д. А., Цырук С. А., Матюнина Ю. В. Разработка алгоритма ценозависимого управления потреблением электрической энергии на промышленном предприятии // Промышленная энергетика. 2020. № 4. С. 2–7. DOI 10.34831/EP.2020.66.67.001.
3. Андреева Е. Г., Карев А. С. Исследование влияния состава электроприемников домохозяйства на его энергопотребление // Фёдоровские чтения–2022 : ЛП Всерос. науч.-практ. конф. с Междунар. участием (Москва, 15–18 нояб. 2022 г.). М. : Изд. дом МЭИ, 2022. С. 284–287.

УДК 621.311

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-49-52

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРЕДПРИЯТИЯ СВЯЗИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ДЛЯ СГЛАЖИВАНИЯ ПРОФИЛЯ МОЩНОСТИ

### USE OF A RENEWABLE ENERGY SOURCE IN THE ELECTRICAL SYSTEM OF A TELECOMMUNICATIONS ENTERPRISE TO SMOOTH OUT THE POWER PROFILE

Б. А. Косарев<sup>1,2</sup>, Г. А. Кошчук<sup>1</sup>, А. А. Охотников<sup>1</sup>, В. К. Федоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники), г. Омск, Россия

B. A. Kosarev<sup>1,2</sup>, G. A. Koshchuk<sup>1</sup>, A. A. Okhotnikov<sup>1</sup>, V. K. Fedorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>2</sup>Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics), Omsk, Russia

**Аннотация.** Любое предприятие связи является потребителем с толчковым характером нагрузки. Для сглаживания профиля мощности в такую электротехническую систему может быть добавлена электростанция на основе возобновляемого источника энергии. В исследовании выполнен расчет параметров генерирующего оборудования электростанции, описаны его конструктивные особенности и приведен алгоритм управления.

**Ключевые слова:** электротехническая система, возобновляемые источники энергии, алгоритм управления, предприятие связи, распределенные источники энергии, профиль мощности, распределенная генерация.

**Abstract.** Any communications enterprise is a consumer with a variable load. To smooth the power profile, a power plant based on a renewable energy source can be added to such an electrical system. The study calculated the parameters of the generating equipment of the power plant, described its design features and presented a control algorithm.

**Keywords:** electrical system, renewable energy sources, control algorithm, communication enterprise, distributed energy resources, power profile, distributed generation.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации с 2017 г. действует механизм ценозависимого электропотребления, направленный на уменьшение пиковых нагрузок со стороны потребителей в обмен на стимулирующие выплаты. Такой способ регулирования электропотребления позволяет снизить общесистемные затраты на генерацию и передачу электроэнергии.

Одним из способов уменьшить пиковую нагрузку потребителя в обмен на стимулирующие выплаты от поставщика электроэнергии является интеграция в его электротехническую систему электростанции малой мощности. В области распределенной энергетики такие электростанции принято обозначать как распределенные источники энергии (РИЭ) [1, 2]. Доля РИЭ от общей выработки электроэнергии неизменно увеличивается, поэтому вопрос сглаживания профиля мощности потребителей при помощи таких электростанций является актуальным [3, 4].

Для конкретизации объекта исследования рассмотрим в качестве примера предприятие связи с коротковолновыми радиопередатчиком и радиоприемником. Величина нагрузки такого предприятия имеет толчковый характер (рис. 1).

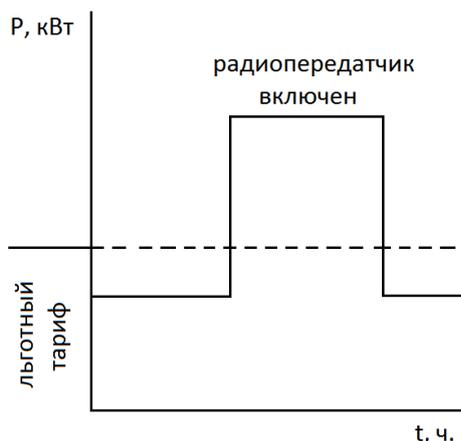


Рис. 1. График нагрузки предприятия связи

Это связано со скачкообразным увеличением и уменьшением электропотребления радиопередатчика, соответственно, в начале и конце сеанса связи. Электропотребление радиопередатчика может увеличиваться в 2-7 раз. Поэтому пропускная способность элементов системы электроснабжения предприятия связи на этапе проектирования закладывается с соответствующим запасом. При этом увеличивается стоимость не только проекта, но и ремонтно-профилактических работ, которые неизбежны в процессе эксплуатации электросетевого оборудования. Для поддержания значений параметров режима в допустимых пределах в условиях нагрузки с толчковым характером на электростанциях требуется дополнительный запас по динамической устойчивости, т.е. наличие горячего резерва. С экономической точки зрения такой резерв тоже невыгоден. Таким образом, сглаживание профиля мощности предприятия связи при помощи РИЭ представляется целесообразным.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим способ сглаживания профиля мощности предприятия связи при помощи гибридной электростанции, в состав которой входят ветрогенератор с сетевым инвертором и накопителем электрической энергии, а также газовый генератор. Структурная схема гибридной электростанции представлена на рис. 2.

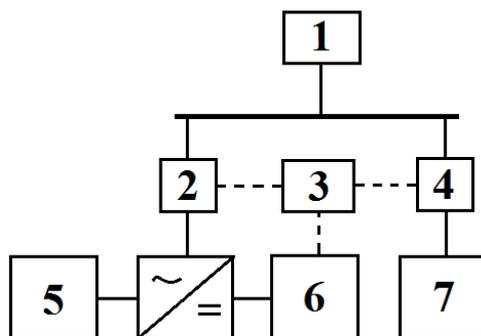


Рис. 2. Структурная схема гибридной электростанции:

1 – нагрузка; 2, 4 – выключатели; 3 – система автоматического управления;  
5 – ветрогенератор; 6 – накопитель электрической энергии; 7 – газовый генератор

Емкость накопителя электрической энергии выбирается достаточной для компенсации электропотребления радиопередатчика в течение самого длительного сеанса связи. Зарядный ток накопителя энергии и мощность генерирующего оборудования (ветрогенератора и газового генератора) должны обеспечивать его полный заряд к моменту начала самого продолжительного сеанса связи [5].

Гибридная электростанция не обеспечивает автономную работу электротехнического комплекса предприятия связи (рис. 3).

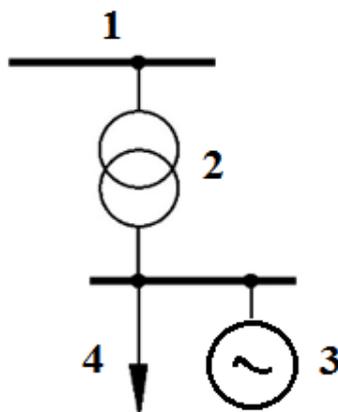


Рис. 3. Однолинейная схема питания электротехнической системы:  
1 – внешняя сеть; 2 – трансформаторная подстанция предприятия связи;  
3 – гибридная электростанция; 4 – нагрузка

Источником питания для потребителя является внешняя система электроснабжения, гибридная электростанция подключается на параллельную работу с внешней системой электроснабжения только на период работы радиопередатчика.

### III. ТЕОРИЯ

Последовательность оперативных переключений в электротехнической системе предприятия связи в зависимости от уровня заряда накопителя энергии, выходной мощности ветрогенератора, длительности сеанса связи определяет система автоматического управления (САУ).

Опишем алгоритм работы САУ. САУ постоянно контролирует уровень заряда накопителя электрической энергии и режим работы радиопередатчика. При подаче сигнала с пульта оператора на включение радиопередатчика САУ оценивает уровень заряда накопителя. Если уровень заряда накопителя ниже допустимого, тогда на параллельную работу с внешней системой электроснабжения подключается газовый генератор и подается питание на радиопередатчик. После завершения сеанса связи генератор отключается. При достаточном уровне заряда накопителя электрической энергии радиопередатчик получает питание от накопителя через преобразователь (сетевой инвертор).

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Выполним расчет параметров электрооборудования гибридной электростанции на основе ветрогенератора и газового генератора.

Пусть в условиях ценозависимого электропотребления в дневное время суток потребляемая предприятием связи мощность не должна превышать 15 кВт. На предприятии используется радиопередатчик с мощностью излучения 1 кВт, коэффициентом полезного действия 35 %. При включении радиопередатчика потребляемая мощность увеличивается на 2857 Вт. Тогда следует использовать ветрогенератор с установленной мощностью 3 кВт. Зададим вертикально осевую конструкцию ветрогенератора для уменьшения массогабаритных показателей генерирующей установки и более эффективной работы в условиях низкой скорости ветра: диаметр ветроколеса – 3 метра, высота лопастей – 2 метра, масса – около 200 кг. Такой генерирующей установке соответствует накопитель электрической энергии со следующими параметрами: включенные на параллельную работу 4 литий-ионных аккумуляторных батареи с напряжением 12 В и емкостью 100 А·ч, максимальным зарядным током 100 А. Массогабаритные показатели одной батареи: 10 кг, 30х20х20 см. Параметры сетевого инвертора с бестрансформаторной конструкцией: мощность – 3 кВт, масса – 10 кг, габариты – 40х40х20 см. Параметры газового генератора: мощность – 5.5 кВт, фазный ток – 8 А, масса – 84 кг, габариты – 73х57х60 см. Исходя из мощности генерирующего оборудования для распределительного устройства следует использовать управляемые трехполюсные выключатели с номинальным значением рабочего тока 8 А, силовые кабели с одножильными медными проводниками с сечением 1.5 мм<sup>2</sup>.

## V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предприятие связи предъявляет повышенные требования к показателям надежности электроснабжения и показателям качества электроэнергии. Наличие в предлагаемой конструкции гибридной электростанции накопителя электрической энергии с инвертором позволяет повысить показатели надежности, а также уменьшить коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения во время сеанса связи. Также на основании расчетов можно сделать вывод, что суммарная масса гибридной электростанции составляет около тонны, если для монтажа сборочных единиц используется металлический контейнер. Для анализа изменения величины температуры внутри контейнера при различных режимах работы силового оборудования требуется проведение натурных испытаний.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ сглаживания профиля мощности потребителя с толчковым характером нагрузки на примере предприятия связи при помощи гибридной электростанции.

В состав гибридной электростанции входят ветрогенератор с сетевым инвертором и накопителем электрической энергии, газовый генератор, распределительное устройство с управляемыми выключателями, а также блок системы автоматического управления. Выполнен расчет параметров силового оборудования и конструкции электростанции.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ehsan A., Yang Q. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques // *Applied Energy*. 2018. Vol. 210. P. 44–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.106>.
2. Khludnev A. M., Fathabad A. M., Cheng J. [et al.] Data-Driven Planning for Renewable Distributed Generation Integration // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 35, no. 6. P. 4357–4368. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3001235.
3. Бык Ф. Л., Илюшин П. В., Мышкина Л. С. Особенности и перспективы развития распределенной энергетики в России // *Известия высших учебных заведений. Сер. Электромеханика*. 2021. Т. 64, № 6. С. 78–87. DOI 10.17213/0136-3360-2021-6-78-87.
4. Статкевич А. В., Тимофеев С. С., Шишлаков В. Ф. Современные ветроэнергетические установки: обзор и тенденции развития // *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : материалы XXV Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 30 мая – 03 июня 2022 г.)*. Санкт-Петербург : Изд-во ГУАП, 2022. Ч. 1. С. 257–261.
5. Косарев Б. А., Кривальцевич С. В., Охотников А. А., Федоров В. К. Электротехническая система с распределенной генерацией радицентра с резкопеременным характером нагрузки // *Омский научный вестник*. 2022. № 1 (181). С. 55–60. DOI 10.25206/1813-8225-2022-181-55-60.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ ТОМСКА И БУДЕННОВСКА

### OUTCOMES OF ENERGY-SAVING REGULATION OF THERMAL ENERGY ON THE EXAMPLE OF TOMSK AND BUDENNOVSK

О. В. Стукач<sup>1,3</sup>, П. А. Зорин<sup>2</sup>, Н. Г. Федоров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>ООО "Центр сервисного обслуживания", г. Томск, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва, Россия

O. V. Stukach, P. A. Zorin, N. G. Fedorov

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Service Center, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>HSE University, Moscow, Russia

**Аннотация.** Организация потребления тепловой энергии в жилых зданиях довольно затратна, поэтому тема рационального использования тепловой энергии и энергосбережения не теряет актуальности для всех регионов страны. На примере изучения динамики теплотребления в энергоэффективных многоквартирных домах городов Томска и Будённовска показана необходимость скорейшего внедрения энергосберегающих мероприятий. В связи с возрастанием потребностей и ураганным ростом цен на тепловую энергию в сфере жилищно-коммунального хозяйства требуется усиление активной деятельности в области автоматического регулирования теплоснабжения, поскольку оно даёт наибольшую экономию энергии по сравнению с теплозащитой.

**Ключевые слова:** удельное потребление энергоресурсов, многоквартирное жилое здание, теплосбережение, энергосбережение, энергоэффективность, мера энергоэффективности.

**Abstract.** Consumption of heat in residential buildings is quite expensive, so the subject of efficient use of thermal energy and saving one does not lose urgency for all Russian regions. Using the example of studying the dynamics of heat thermal energy in efficient multi-storey buildings in Tomsk and Budennovsk, the need for the early introduction of energy-saving events is shown. It is necessary to strengthen activity in the field of auto-regulation of heat supply, since it provides the greatest energy savings compared to thermal protection due to the increasing needs and the large price for thermal energy in the field of household and municipal service.

**Keywords:** specific energy consumption, multi-storey residential building, heat saving, energy saving, energy efficiency, energy efficiency service.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Энергосбережение является одним из главных стратегических направлений приоритетного технологического развития страны, а рациональное энергопотребление будет актуальной темой исследования долгие годы [1–3]. Поскольку половина вырабатываемого тепла потребляется для обогрева и горячего водоснабжения многоквартирных жилых зданий, представляет интерес исследование факторов, влияющих на энергосбережение [2]. В предыдущих работах авторов было показано, что повышение энергоэффективности зданий выгодно начинать не с теплозащиты, что связано с ремонтом здания, а со скорейшего перевода теплоузлов на автоматическое регулирование [4–7]. В статье будет показано, что положительный эффект от установки регулятора проявляется сразу, а затраты на теплозащиту окупаются длительное время. Сейчас многие предприятия наладили выпуск погодозависимых регуляторов. Их работа основана на обеспечении зависимости подачи теплоносителя от температуры наружного воздуха. Попутно это обеспечивает комфортную температуру внутри зданий. Это становится особенно важно в современных условиях глобального изменения климата: изменение температуры наружного воздуха в течение суток может измениться на 15–20 градусов или больше.

## II. ПЕРВЫЙ ПРИМЕР (ГОР. БУДЕННОВСК)

Самый энергоэффективный дом в городе Буденновске – ул. 8-й мкр., д. 19. На google-карте дом выглядит отремонтированным с зашпаклёванными межпанельными швами (рис. 1). В остальных ситуациях с энергоэффективностьюкратно хуже.



Рис. 1. Жилой дом г. Буденновска (ул. 8-й мкр., д. 19)

На рис. 2 приведены нормализованные графики ежесуточного потребления тепловой энергии по общедомовому прибору учёта  $Q_N$ , взятого с обратным знаком, значения температуры наружного воздуха с сайта Росгидрометцентра  $T\text{-out}_N$ , измеренные каждые три часа (восемь значений в сутки) и рассчитанная по этим значениям средняя температура  $Temp\_Mean\_N$ . Для нормализации из каждого измерения вычитается среднее значение переменной и делится на среднеквадратическое отклонение. При этом среднее значение всех рассмотренных переменных становится нулевым, а дисперсия равна единице.

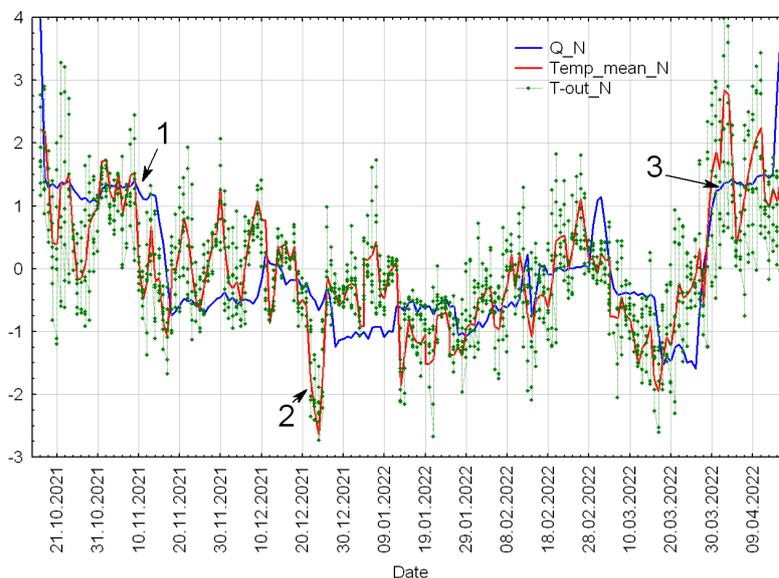


Рис. 2. Динамика теплотребления и температура наружного воздуха для дома в г. Будённовске

В идеале графики обратного теплотребления и температуры должны минимально отличаться друг от друга. Но до этого далеко. Жителям такого здания явно некомфортно, и это главным образом выражается в пониженной температуре в ноябре и марте. Наличие продолжительных областей с почти постоянным теплотреблением (области 1, 3) говорит о том, что никакого регулирования по сути нет, теплотехники открывают соответствующий кран и уходят на длительное время, пока температура атмосферы существенно не изменится. Резкое уменьшение температуры не приводит к изменению потребления тепла (область 2) – жители явно замерзают.

## III. ВТОРОЙ ПРИМЕР (ГОР. ТОМСК)

Второй пример связан с авторегулированием тепла в доме г. Томске (ул. Киевская, 26). Автоматические регуляторы с датчиками наружной температуры установлены в первом подъезде (рис. 3) и в остальной части дома. Площадь этих двух секций разная, поэтому учёт для них ведётся раздельно (рис. 4).



Рис. 3. Датчик наружной температуры (ул. Киевская, 26)

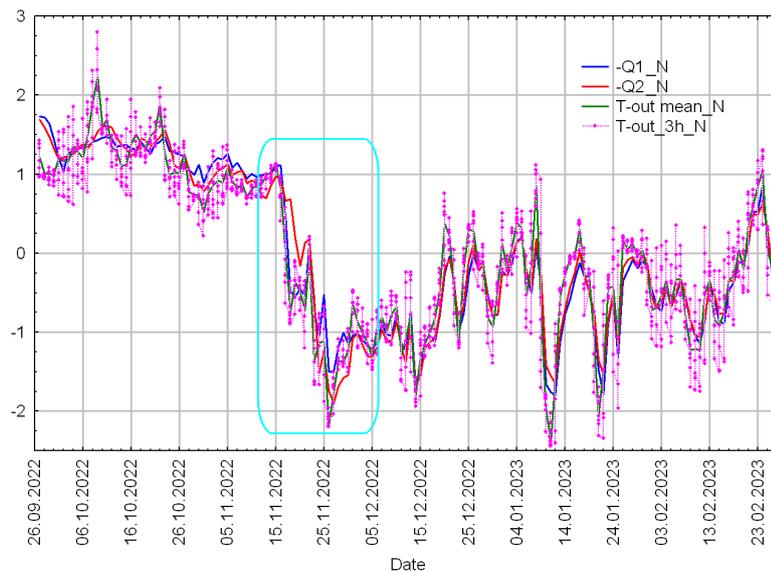


Рис. 4. Теплопотребление и температура наружного воздуха для здания в г. Томске

На рис. 4 приведены нормализованные графики ежесуточного потребления тепла каждой секции –  $Q1_N$ ,  $-Q2_N$ , взятые с обратным знаком, средняя температура наружного воздуха  $T_{out\_mean\_N}$  и температура  $T_{out\_3h\_N}$ , измеренная каждые три часа.

По сравнению с рис. 2 кривые изменения теплопотребления сильнее зависят от изменения наружной температуры. Наибольший интерес представляют участки с резким изменением температуры. Представим такой выделенный участок в крупном масштабе на рис. 5.

Площадь второй секции дома больше, чем первой, а, следовательно, и больше тепловая инерция. Примем также во внимание разную настройку регуляторов. Видим, что теплопотребление второй секции  $Q2_N$  сильнее отличается от температуры наружного воздуха, чем первой секции  $Q1_N$ .

Несмотря на очевидную неоптимальность работы и значительную ошибку регулирования, видим, что по сравнению с рис. 2 регулирование теплоподдачи с помощью обычного погодозависимого регулятора существенно улучшает энергетическую эффективность дома.

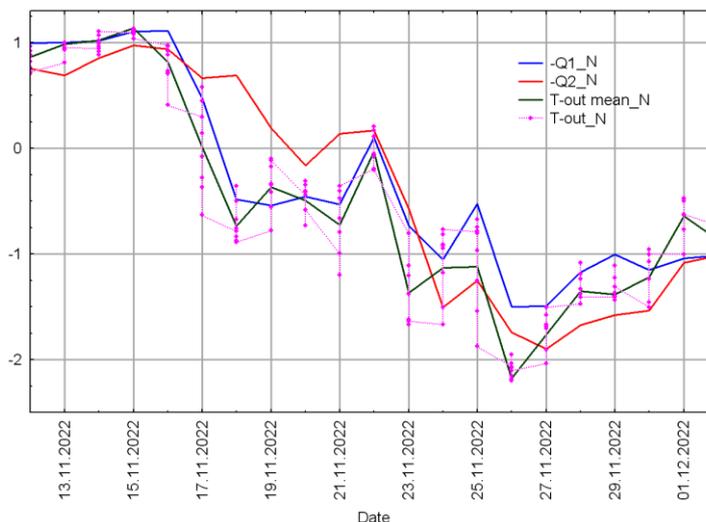


Рис. 5. Участок динамики теплопотребления (рис. 4)

#### IV. ВЫВОДЫ

Современные климатические условия требуют изменений практик теплоснабжения, которые уже давно не отвечают требованиям комфорта проживания и энергоэффективности. Поэтому регулирование тепловой энергии в соответствии с изменением погодных условий является главным подходом к энергосбережению. Установив автоматические системы управления, владельцы многоквартирных жилых зданий рационально используют тепловую энергию. Как показано на примерах статьи, регулирование способно не только снизить затраты на отопление, но и действительно обеспечить больший комфорт жителям.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят ООО "СтавПромСервис" (г. Ставрополь) за предоставленные данные по теплоучёту, управляющую ООО «Развитие» (г. Томск) Ольгу Олеговну Габитову за работы по автоматизации теплопотребления и предоставленные данные.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baldini M., Brøgger M., Jacobsen H., Wittchen K. Cost-effectiveness of energy efficiency improvements for a residential building stock in a Danish district heating area // *Energy Efficiency*. Vol. 13, no. 8. P. 1737–1761. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09889-x>.
2. Levy J., Belaid F. The determinants of domestic energy consumption in France: Energy modes, habitat, households and life cycles // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol 81. P. 2104–2114. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.022.
3. Wang X., Feng W., Cai W. [et al.]. Do residential building energy efficiency standards reduce energy consumption in China? A data-driven method to validate the actual performance of building energy efficiency standards // *Energy Policy*. 2019. Vol. 131. P. 82–98. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.04.022.
4. Зорин П. А., Купреков С. В., Пуговкин А. В., Стукач О. В. Контроль энергоэффективности теплоснабжения зданий типовой застройки // *Электронные средства и системы управления*. 2018. № 1–2. С. 302–305.
5. Стукач О. В., Зорин П. А. Дисперсионный анализ данных учета тепловой энергии в г. Томске // *Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022)* : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 21–22 апр. 2022 г.). Минск : РИВШ, 2022. С. 140–143.
6. Зорин П. А., Стукач О. В. Статистическое моделирование тепловых характеристик жилых домов на основе данных теплосчетчиков // *Новые информационные технологии в исследовании сложных структур* : материалы 13-й Междунар. конф. (Томск, 07–09 сент. 2020. г.) / Том. гос. ун-т. Томск : Изд-во ТГУ. С. 11.
7. Зорин П. А., Стукач О. В. Дисперсионный анализ данных коммерческого учёта тепловой энергии в жилом фонде города Томска // *Наука. Технологии. Инновации* : сб. науч. тр. конф. (Новосибирск, 02–06 дек. 2019 г.) : в 9 ч. / Новосибир. гос. техн. ун-т. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. Ч. 1. С. 72–75.

УДК 621:313

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-57-62

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

### CHARACTERISTICS OF A PERMANENT MAGNETIC SYNCHRONOUS GENERATOR BASED ON AN ASYNCHRONOUS MACHINE

А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, Н. В. Захарова

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

A. S. Tatevosyan, A. A. Tatevosyan, N.V. Zakharova

*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

**Аннотация.** В статье проведено исследование разработанного макетного образца синхронного генератора с постоянными магнитами (СПМ) на основе имитационного моделирования и экспериментальных испытаний. Для проведения экспериментальных исследований разработан испытательный стенд с возможностью регулирования скорости вращения ротора СПМ до 500 об/мин. Макетный образец представляет собой трехфазную синхронную машину, магнитная система статора выполнена на основе магнитной системы статора асинхронной электрической машины.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, постоянные магниты, характеристики машины, стенд для испытания.

**Abstract.** The article conducts a study of the developed prototype of a permanent magnet synchronous generator (PMSG) based on simulation modeling and experimental tests. To conduct experimental studies, a test stand has been developed with the ability to regulate the rotation speed of the PMSG rotor up to 500 rpm. The prototype is a three-phase synchronous machine, the stator magnetic system is based on the stator magnetic system of an asynchronous electric machine.

**Keywords:** synchronous generator, permanent magnets, machine characteristics, test bench.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Топология построения конструктивных схем синхронных магнитоэлектрических генераторов (СПМ) определяет два разных технических решения статора: синхронные машины с независимыми магнитопроводами и с общим цилиндрическим магнитопроводом. Преимуществами последних являются накопленный опыт в проектировании и технологии изготовления статора, в пазах которого размещена трехфазная обмотка: магнитная система статора такого СПМ принципиально соответствует статору асинхронного двигателя. Необходимо отметить, что традиционным подходом при проектировании СПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом является увеличение числа пар полюсов, что обусловлено стремлением к уменьшению скорости вращения ротора при сохранении высокого значения наводимой в витках обмотки статора ЭДС. Соответственно, на роторе СПМ размещены постоянные магниты таким образом, чтобы число полюсов обмотки статора и число полюсов ротора было одинаковым.

При синусоидальном распределении магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитная часть синхронного генератора описывается дифференциальными уравнениями в вращающихся координатах  $d, q$  [1–3; 6], а механическая часть, соответственно, – уравнением движения подвижной части

$$\left\{ \begin{array}{l} L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - R_a i_d + L_q p \omega i_q \\ L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - R_a i_q - L_d p \omega i_d - \psi p \omega \\ J_p \frac{d\omega}{dt} = M_m - F \omega - M_{эм} \\ M_{эм} = 1,5 p \left[ \psi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $i_d, i_q$  – проекции тока статора на оси  $d$  и  $q$  соответственно,  $u_d, u_q$  – проекции напряжений с зажимов генератора на оси  $d$  и  $q$  соответственно,  $L_d, L_q$  – индуктивности фазы статора по продольной и поперечной оси соответственно,  $p$  – число пар полюсов,  $\omega$  – угловая частота вращения ротора,  $\psi$  – потокосцепление фазы статора;  $F$  – коэффициент, учитывающий трение в подшипниках,  $M_m$  – механический момент привода,  $J_p$  – приведенный к валу момент инерции машины,  $M_{эм}$  – электромагнитный момент,  $R_a$  – активное сопротивление фазы обмотки статора.

Для неявнополюсного ротора СГПМ воздушный зазор между внутренней поверхностью статора и ротором получается равномерным по всей окружности, поэтому индуктивные сопротивления  $X_d = X_q$  и индуктивности фаз статора  $L_d = L_q$  по продольной и поперечной оси соответственно равны. Поскольку магнитный поток рассеяния фазы обмотки якоря незначителен, то индуктивными сопротивлениями рассеяния обмотки статора по осям  $d$  и  $q$  в уравнении (3) можно пренебречь. На векторной диаграмме (рис. 1) сумму векторов напряжений на индуктивных сопротивлениях фаз статора по продольной и поперечной оси заменим результирующим вектором напряжения на эквивалентном индуктивном сопротивлении фазы обмотки статора

$$jX_q \dot{I}_q + jX_d \dot{I}_d = jX_a \dot{I} . \quad (4)$$

Тогда для явно полюсного СГПМ уравнение электрического равновесия обмотки статора (3) примет вид

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_a + jX_a \dot{I} . \quad (5)$$

Используя соотношения

$$\begin{aligned} IX_a &= \sqrt{(I_q X_q)^2 + (I_d X_d)^2} ; \\ I_d &= I \sin \theta ; I_q = I \cos \theta \end{aligned} , \quad (6)$$

найдем эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки статора

$$X_a = \omega L_a = \sqrt{(X_q \cos \theta)^2 + (X_d \sin \theta)^2} . \quad (7)$$

С учетом (7) комплексная форма записи уравнения электрического равновесия обмотки статора (5) оказывается независимой от конструктивного исполнения ротора СГПМ, поэтому форма записи уравнений электрического равновесия для мгновенных значений тока, напряжения и ЭДС будет одинаковой

$$e_0 = u + i R_a + L_a \frac{di}{dt} . \quad (8)$$

С учетом (8) уравнение баланса мощности на периоде  $T$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T e_0(t) i dt &= \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R_a dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{d}{dt} \left[ \frac{L_a i^2}{2} \right] dt + \\ &+ \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Очевидно, что второе слагаемое в правой части полученного уравнения тождественно равно нулю. Коэффициент полезного действия СГПМ

$$\eta_e = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u i dt}{\frac{1}{T} \int_0^T [i^2 R_a + u i] dt}. \quad (10)$$

Определим временные зависимости напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$  в обмотке статора, принадлежащие некоторому классу допустимых функций, доставляющие максимум функционалу

$$\eta_e = (1 + P_r^*)^{-1}, \quad (11)$$

где  $P_r^* = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 R_a dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt}$  – относительные потери.

Получим выражение для коэффициента использования

$$k_u = u^* \cdot \left[ \sqrt{1 - \frac{u^{*2} Q_0^2}{1 + Q_0^2}} - \frac{u^*}{\sqrt{1 + Q_0^2}} \right], \quad (12)$$

где  $Q_0 = \frac{X_a}{R_a}$  – добротность обмотки статора.

Анализ выражения (12) показывает, что от значения коэффициента использования зависит мощность тихоходного СГПТ и размеры его магнитной системы. Условие  $\frac{dk_u}{du^*} = 0$  позволяет определить максимальное значение мощности на выходе тихоходного СГПМ. График зависимости  $k_u = k_u(u^*)$  показан на рис. 1.

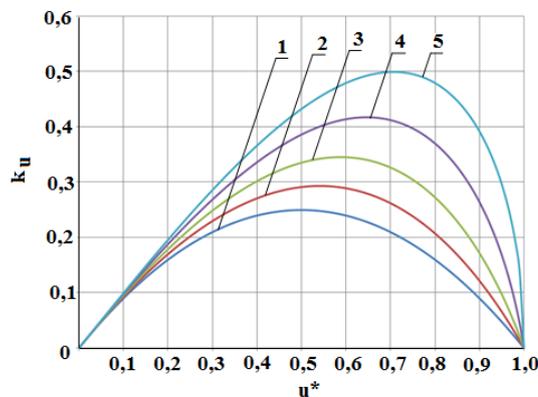


Рис. 1. К определению  $u_{\text{опт}}^*$  в зависимости от добротности обмотки якоря:  
 1 –  $Q_D = 0$ ; 2 –  $Q_D = 1$ ; 3 –  $Q_D = 2$ ; 4 –  $Q_D = 5$ ; 5 –  $Q_D \rightarrow \infty$

Для исследования приведенной на рис. 1. магнитной системы СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом выполнены расчеты в прикладном программном обеспечении, а также разработан лабораторный стенд для испытания СГПМ.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование СГПМ с постоянными магнитами с целью оптимизации магнитной системы является одной из ключевых задач в автономной энергетике. Учитывая использование постоянных магнитов, электрическая машина всегда находится в возбужденном состоянии, следовательно, постоянно присутствует остаточный момент на валу генератора. В ряде случаев для его преодоления применяют кратковременный двигательный режим, т.е. подают напряжение на обмотку статора, раскручивая генератор, и лишь затем переводят машину в генераторный режим. Кроме этого, в машинах с постоянными магнитами остаются актуальными вопросы уменьшения остаточного момента, снижения реакции якоря, расчета потерь в обмотках [4], повышения прочности и надежности конструктивных элементов машин.

Также внимание уделяется разработке стендов для испытаний электрических машин [5].

В статье поставлена задача исследования предложенной конструкции магнитной системы СГПМ на основе конечно-элементного анализа и проведения лабораторных испытаний.

## III. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом проведено в среде Ansys Maxwell 16.0. Моделирование выполнялось при следующих условиях:

- заданной постоянной скорости вращения ротора СГПМ;
- генератор работает на активную нагрузку.

Конструкция магнитной системы СГПМ представлена на рис. 2

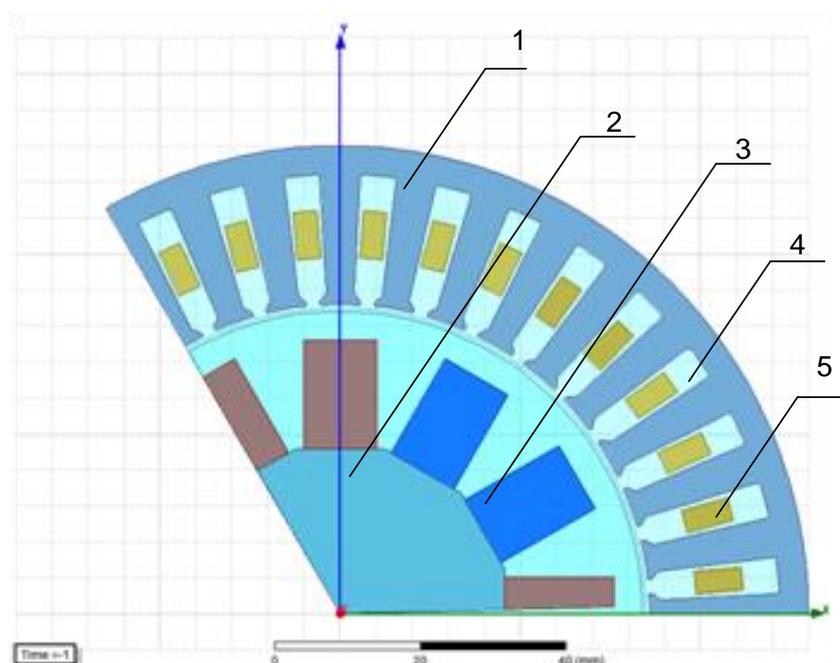


Рис. 2. Конструкция магнитной системы СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в программном обеспечении: 1 – статор, 2 – ротор, 3 – постоянные магниты, 4 – пазы статора, 5 – трехфазная обмотка.

Параметры СГПМ с цилиндрическим магнитопроводом приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1  
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СГПМ С ОБЩИМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Параметры	Величина
Номинальная мощность $P_n$ , кВт	1.0
Номинальное напряжение $U_n$ , В	220
Номинальный ток $I_n$ , А	4.5
Частота вращения $n$ , об/мин	500
Внешний диаметр статора $D_a$ , мм	133
Внутренний диаметр статора $D_i$ , мм	90
Длина статора $L_{ст}$ , мм	155
Число пазов $Z1$	36
Полосное деление $\tau$	9
Число параллельных ветвей $a$	1
Число пазов на полюс и фазу $q$	2
Число полюсов $2p$	6

Результаты моделирования приведены на рис. 3.

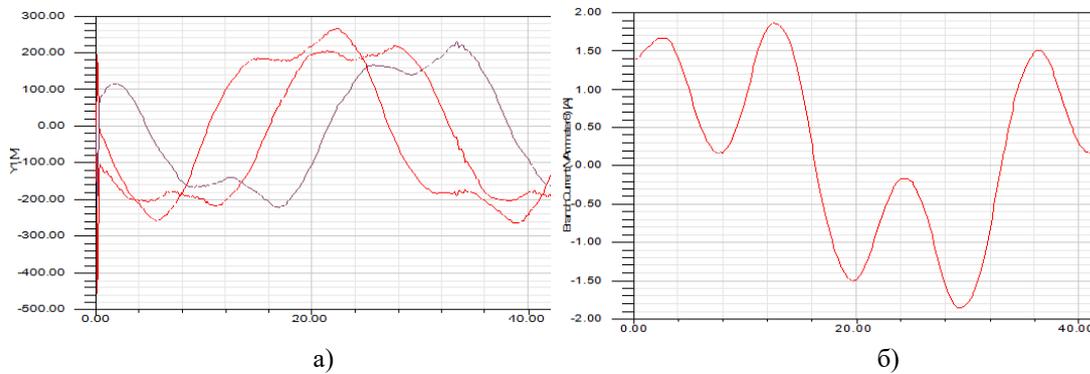


Рис. 3. Результаты моделирования: выходное напряжения (а), ток фазы А в нагрузке (б)

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Разработанный макетный образец СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом приведен на рис.

4.

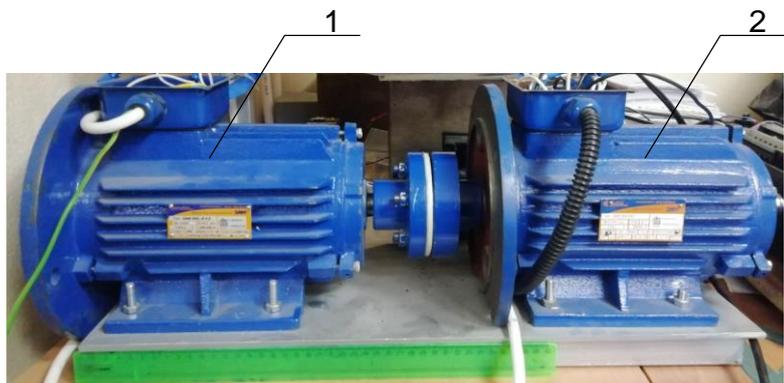


Рис. 4. Приводной двигатель (1) и макетный образец СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом (2) (а), стенд для испытания СГПМ (б).

Экспериментальное исследование СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом проведено на испытательном стенде, функциональная схема которого приведена на рис. 5.

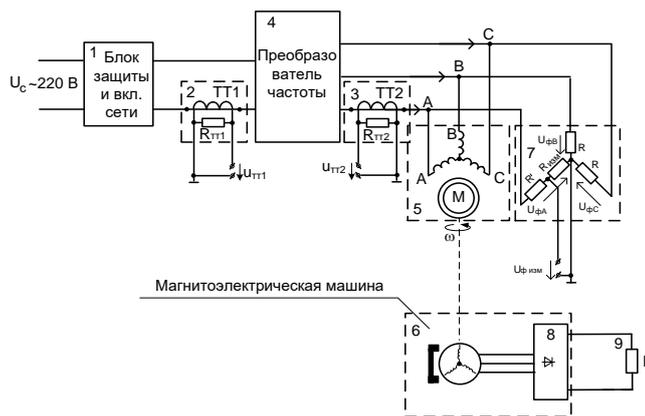


Рис. 5. Функциональная схема для испытания СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом

Результаты экспериментального исследования СГПМ и сравнение с результатами моделирования приведены на рис. 6.

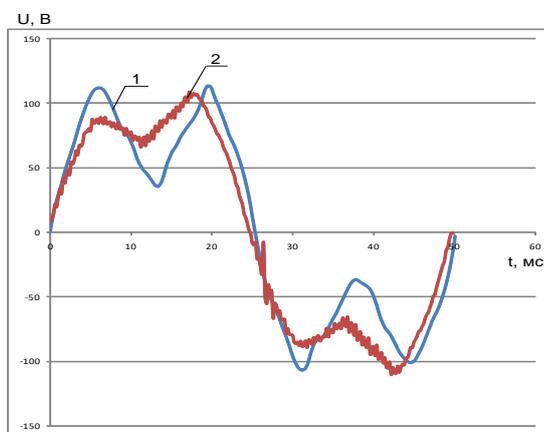


Рис. 6. Результаты экспериментального исследование СГПМ

## VI. ВЫВОД

Разработана имитационная модель СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом и проведена ее верификация путем исследования макетного образца СГПМ на испытательном стенде в диапазоне регулирования скорости вращения вала индуктора от 100 до 500 об/мин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганджа С. А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 1 (81). С. 25–29.
2. Исмагилов, Ф. Р., Герасин, А. А., Хайруллин, И. Х., Вавилов, В. Е. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М. : Машиностроение, 2014. 267 с. ISBN 978-5-94275-755-7.
3. Олейников, А. М., Канов, Л. Н., Матвеев, Ю. В., Зарицкая, Е. И. Математическая модель автономной безредукторной ветроэлектрической установки на генераторе с постоянными магнитами // Электротехника та електроенергетика. 2010. № 2. С. 62–67.
4. Пахомин Л. С., Пахомин С. А. Расчёт добавочных потерь в обмотках вентильного двигателя с использованием пакета FEMM // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63, № 6. С. 5–10. DOI 10.17213/0136-3360-2020-6-5-10.
5. Исмагилов Ф. Р., Афанасьев Ю. В., Юшкова О. А. [и др.]. Стенды для испытаний высокоскоростных электрических машин // Электротехнические комплексы и системы : материалы I Всерос. конф. по электрическим машинам в рамках Междунар. науч.-практ. конф. (Уфа, 26–28 окт. 2022 г.) : в 2-х томах / Уфим. ун-т науки и технологий. Уфа : Изд-во УУНиТ, 2022. Т. 1. С. 106–118.
6. Татевосян А. А., Огорелков Б. И., Татевосян А. С. Расчет индуктированной ЭДС в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперечного сечения // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 179–183.

УДК 621:313

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-63-68

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБОРОТОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ ИМИТАТОРА ВЕТРОКОЛЕСА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

### FREQUENCY METHOD OF REGULATING THE SPEED OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR AS A SIMULATOR OF A WIND WHEEL OF A WIND POWER GENERATOR

А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, Н. В. Захарова

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

A. S. Tatevosyan, A. A. Tatevosyan, N.V. Zakharova

*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

**Аннотация.** В статье рассматривается исследование режимов работы синхронного генератора с постоянными магнитами модульного типа (СГПМ) при различной скорости вращения индуктора. Разработана имитационная модель и лабораторный стенд для ее верификации. Также в статье рассматривается способ регулирования выходного напряжения за счет переключения модулей электромагнитов синхронного генератора при различной скорости вращения индуктора и коэффициента загрузки.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, постоянные магниты, характеристики машины, стенд для испытания.

**Abstract.** The article conducts a study of the developed prototype of a permanent magnet synchronous generator (PMSG) based on simulation modeling and experimental tests. To conduct experimental studies, a test stand has been developed with the ability to regulate the rotation speed of the PMSG rotor up to 500 rpm. The prototype is a three-phase synchronous machine, the stator magnetic system is based on the stator magnetic system of an asynchronous electric machine.

**Keywords:** synchronous generator, permanent magnets, machine characteristics, test bench.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Появление на потребительском рынке высокоэритивных постоянных магнитов из сплава Nd-Fe-B определяет повышенный интерес к разработке СГПМ. Многообразие конструктивных схем, отсутствие затрат на возбуждение магнитного потока, высокий электромагнитный КПД делают этот тип генераторов в составе ветроэнергетических установок (ВЭУ) целесообразным и экономически привлекательным [1-5]. На основе результатов расчетов оптимальной геометрии магнитной системы модульного СГПМ разработана базовая конструкция, состоящая из 6 пар полюсов (12 постоянных магнитов) и 8 электромагнитов [6, 7]. Магнитная система опытного образца тихоходного СГПМ модульного типа показана на рис. 1, а внешний вид макетного образца – на рис. 2. Электромагниты СГПМ представляют собой независимые модули, в обмотке которых наводится ЭДС при вращении ротора с постоянными магнитами.

Исследуемый образец предложенной конструкции тихоходного СГПМ характеризуется следующими параметрами: номинальная мощность  $S_n = 500 \text{ VA}$ , номинальное напряжение на зажимах обмотки якоря  $U_n = 220 \text{ B}$ , номинальная частота вращения  $n = 400 \text{ об/мин}$ , номинальная частота тока  $f = 20 \text{ Гц}$ , число фаз  $m = 1$ , число пар полюсов  $p = 3$ , число электромагнитов с П-образным шихтованным магнитопроводом  $N = 8$ . Обмотка выполнена проводом ПЭТВ-2.

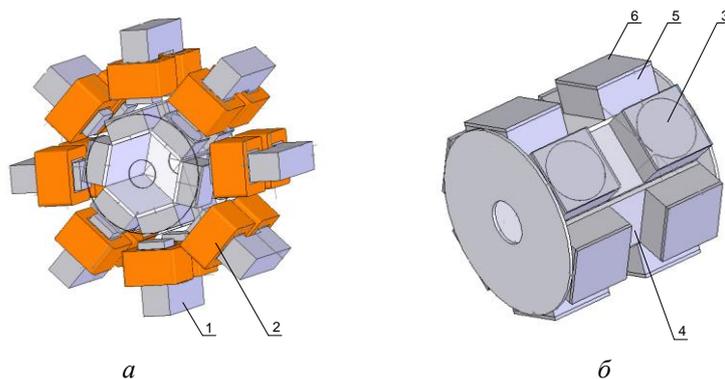


Рис. 1. Магнитная система тихоходного СГПМ модульного типа в собранном виде (а) и конструкция ротора/индуктора (б): 1 – магнитопровод электромагнита, 2 – катушка, 3 – постоянные магниты, 4 – стальная пластина, 5 – алюминиевый корпус для размещения постоянного магнита, 6 – алюминиевая крышка.



Рис. 2. Макетный образец СГПМ модульного типа:  
а – статор, б – ротор

На каждом сердечнике электромагнита находятся две катушки с числом витков  $W = 300$ . В конструкции СГПМ используются высококоэрцитивные постоянные магниты, изготовленные из сплава NdFeB марки N 38 в форме диска диаметром 55 мм и высотой 25 мм, имеющие радиальное направление намагничивания, остаточную индукцию  $B_r = 1.2 \text{ Тл}$ , коэрцитивную силу  $H_c = 955 \text{ кА/м}$  и магнитную энергию  $(BH)_{max} \approx 300 \text{ кДж/м}^3$ . Удельное сопротивление и плотность материала постоянного магнита равны соответственно  $\rho_m = 1.4 - 1.45 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\gamma_m = 7500 \text{ кг/м}^3$ .

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование рабочих процессов энергопреобразования СГПМ целесообразно проводить с использованием макетных образцов на разработанных лабораторных стендах. Как правило, в состав стенда для испытаний входит асинхронный электропривод с частотным управлением. Это традиционное техническое решение позволяет регулировать скорость вращения индуктора СГПМ, тем самым осуществлять исследование режимов в широком диапазоне скоростей. Вместе с тем указанные стенды обеспечивают заданную скорость вращения СГПМ без учета момента сопротивления, возникающего на валу СГПМ. Для этого мощность асинхронного двигателя выбирается с большим запасом, что не соответствует реальной скорости вращения ветроколеса, которая определяется не только скоростью ветрового потока, но и моментом сопротивления генератора, обусловленного нагрузкой.

Появление на рынке преобразователей частоты с открытой программной платформой, например, MBS-FC-01 компании «Мехатроника-ПРО» (г. Томск) [8], позволяет регулировать скорость вращения машины с учетом статистических данных, заданных в виде таблицы для различной скорости ветрового потока и различном коэффициенте загрузки СГПМ. Одним из таких решений возможно применение нерасетевых моделей в составе системы управления асинхронного электропривода. Для СГПМ модульного типа такие системы также могут переключать электромагниты, тем самым снижая момент сопротивления при низком коэффициенте загрузки.

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Результаты математического моделирования предложенной конструкции тихоходного СГПМ в прикладном программном обеспечении сопоставлены с результатами экспериментального исследования его макетного образца на испытательном стенде (рис. 3). На стенде регулирование угловой скорости вращения вала тихоходного СГПМ осуществлялось с помощью частотного управления асинхронным двигателем, вал которого связан с валом синхронного генератора втулочной муфтой. Измерение скорости вращения вала производилось цифровым контактным тахометром. Снятие временных диаграмм напряжений на выводах обмотки якоря СГПМ и резистивном датчике тока сопротивлением  $R_{из} = 1 \text{ Ом}$  выполнено с помощью двухканального USB осциллографа, работающего в режиме самописца и щупом для осциллографа с делителем 1:10.

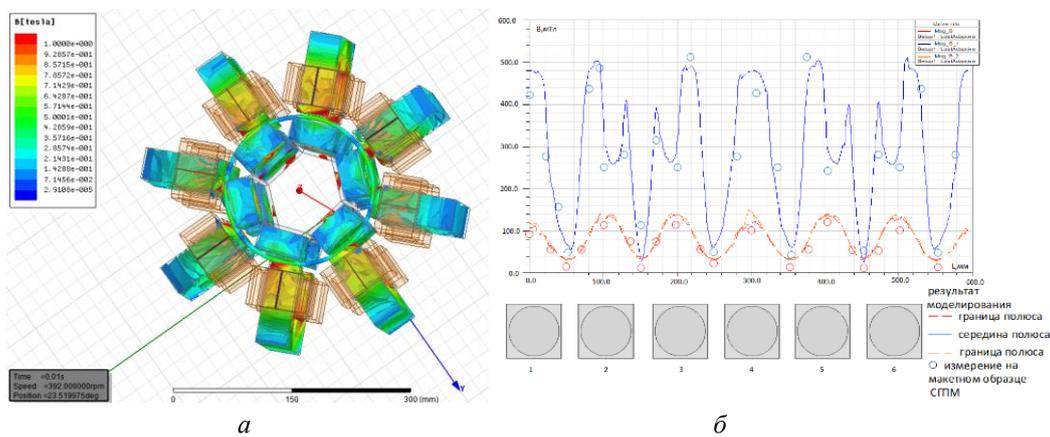


Рис. 3. Магнитная индукция: расчет имитационной модели (а) и измерение при помощи тесламетра на макетном образце (б)

Обеспечение заданной скорости вращения индуктора СГПМ осуществляется приводным асинхронным двигателем при помощи преобразователя частоты. Экспериментальные временные зависимости напряжения и тока в обмотке якоря СГПМ в режимах холостого хода и короткого замыкания показаны на рис. 4.

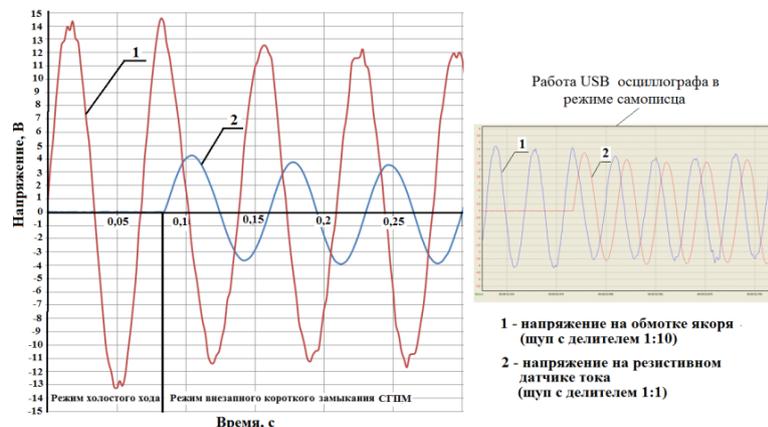


Рис. 4. Осциллограммы напряжений одной половины обмотки якоря и напряжения на резистивном датчике тока в режиме холостого хода и внезапного короткого замыкания СГПМ

Пусковые и установившиеся процессы ветроэнергетической установки зависят от многих внутренних и внешних факторов, к числу которых можно отнести особенности конструктивного исполнения ветроколеса и СГПМ, ветровые нагрузки географического расположения ВЭУ, характер и параметры присоединенной мощности. Внешние факторы, оказывающие влияние на работу ВЭУ ввиду особенности назначения, являются сложнопрогнозируемыми, что обуславливает задачу создания ВЭУ как ВЭТК сложной, жестко подчиненной условиям эксплуатации в конкретный момент времени.

#### IV. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Одним из вариантов решения задачи ввод/вывода из электрической цепи ЭМ является использование в системе управления СГПМ модуля искусственного интеллекта – нейронной сети (НС). При обучении НС могут быть использованы такие параметры режима работы СГПМ как скорость ветра, коэффициент загрузки генератора и результирующее выходное напряжение ВЭУ при различных комбинациях, включенных ЭМ (рис 6.2). Обученная нейронная сеть может быть использована в системе управления для определения в реальном времени количества ЭМ, наиболее целесообразного для текущего режима работы ВЭУ. На вход системы управления поступают сигналы с датчика скорости ветроколеса, а также сигналы с датчиков тока и напряжения, определяемые величиной и характером электрической нагрузки. Кроме этого, системе управления необходимо задать желаемое значение напряжения, которое СГПМ должен поддерживать на выходных клеммах.

Анализ работы нейронной сети может быть проведен с использованием стандартного расширения Neural Network, входящего в состав среды MatLab 2019. При обучении НС используется зависимость выходного напряжения СГПМ от количества включенных ЭМ при определенной скорости вращения ротора и коэффициенте загрузки ВЭУ. Эти данные могут быть получены на основании решения уравнений, устанавливающих взаимосвязь конструктивных параметров СГПМ с энергетическими показателями его работы, а также использованы при исследовании предложенных моделей СГПМ в программном комплексе ANSYS. Данные о режимах работы ВЭУ могут быть также получены экспериментальным путем перед вводом в эксплуатацию ВЭУ как в лабораторных условиях, так и при установке ВЭУ на открытой местности. Учитывая особенность НС, заключающуюся в возможности обучения в произвольный момент времени, целесообразным является режим корректировки весовых коэффициентов НС на основе статистических данных о фактической взаимосвязи указанных параметров в процессе эксплуатации ВЭУ. Структура данных для входного слоя НС может быть представлена табл. 1.

ТАБЛИЦА 1  
Данные для обучения НС для СГПМ в режиме холостого хода ( $k_3=0$ )

ЭМ	U <sub>вых</sub> , В	n, об/мин	ЭМ	U <sub>вых</sub> , В	n, об/мин	ЭМ	U <sub>вых</sub> , В	n, об/мин	ЭМ	U <sub>вых</sub> , В	n, об/мин
2	28.94	100	4	52.34	100	6	68.23	100	8	75.49	100
2	35.18	120	4	62.95	120	6	81.79	120	8	91.17	120
2	41.14	140	4	73.49	140	6	95.39	140	8	106.52	140
2	46.88	160	4	83.98	160	6	109.02	160	8	121.58	160
2	52.43	180	4	94.42	180	6	122.66	180	8	136.39	180
2	57.87	200	4	104.82	200	6	136.31	200	8	150.99	200
2	63.24	220	4	115.20	220	6	149.96	220	8	165.42	220
2	68.60	240	4	125.58	240	6	163.58	240	8	179.71	240
2	73.99	260	4	135.95	260	6	177.18	260	8	193.89	260
2	79.48	280	4	146.33	280	6	190.74	280	8	208.02	280
2	85.11	300	4	156.74	300	6	204.26	300	8	222.13	300

Обучение НС выполняется в расширении MatLab Deep Learning Space при помощи модуля Neural Network Start (nnstart). Используется двухслойная структура НС, количество нейронов в скрытом слое равно 30.

После обучения НС MatLab позволяет проверить созданную нейронную сеть на соответствие внешним факторам путем расчета регрессии и ошибки. Эти показатели определяются путем вычисления разницы между входными и выходными параметрами.

Имитационная модель ВЭУ на основе тихоходного СГПМ модульного типа с системой управления, включающей НС, приведена на рис. 5.

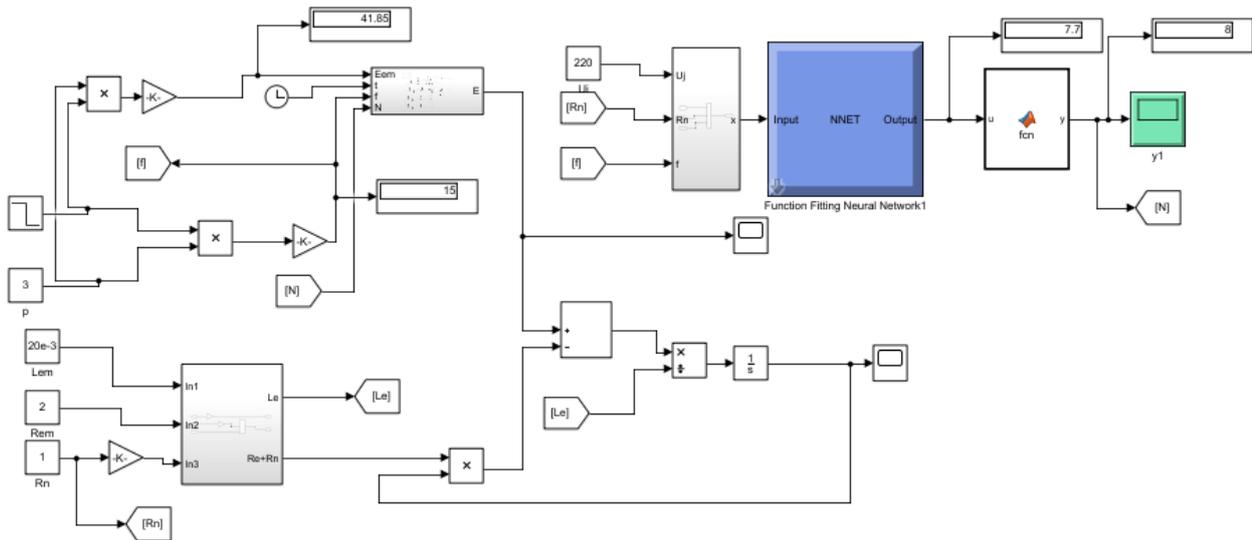


Рис. 5. Имитационная модель ВЭУ с СГПМ модульного типа под управлением нейронной сети

При изменении скорости вращения вала производится расчет количества включенных электромагнитов, обеспечивающих заданное напряжение на выходе тихоходного синхронного генератора.

На рис. 6 приведена временная характеристика напряжения на выходе СГПМ модульного типа.

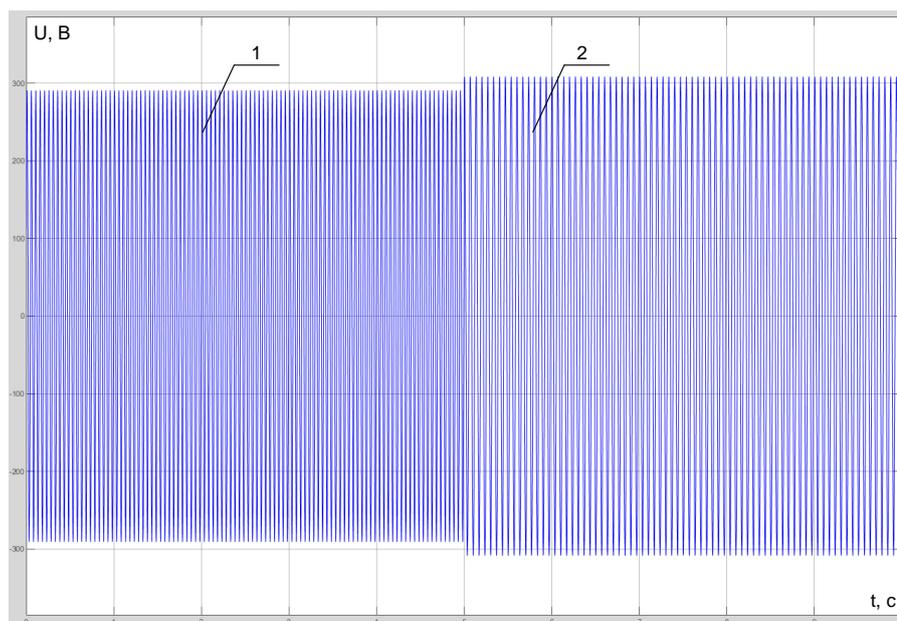


Рис. 6. Выходное напряжение при снижении скорости вращения вала генератора с 400 об/мин (1) до 300 об/мин (2)

## VI. ВЫВОД

Подтверждена эффективность применения системы управления на базе нечеткой логики для работы тихоходного СГПМ модульного типа в составе ВЭТК ВЭУ, заключающаяся в возможности коммутации катушек ЭМ с независимыми магнитопроводами в зависимости от коэффициента загрузки, силы и скорости ветра и напряжения на выходе синхронного генератора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруких П. П., Безруких П. П., Грибков С. В. Ветроэнергетика : справ.-метод. изд. / под общ. ред. П. П. Безруких. М. : Теплоэнергетик, 2014. 299 с. ISBN 978-5-98385-014-9.
2. Кривцов В. С., Олейников А. М., Яковлев А. И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы. Харьков : Изд-во ХАИ, 2003. 400 с. ISBN 966-662-044-8.
3. Лукутин Б. В., Суржикова О. А., Шандарова Е. Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении : моногр. М. : Энергоатомиздат, 2008. 231 с. ISBN 978-5-283-03272-9.
4. Олейников А. М., Канов Л. Н., Матвеев Ю. В., Зарицкая Е. И. Математическая модель автономной безредукторной ветроэлектрической установки на генераторе с постоянными магнитами // Электротехника та електроенергетика. 2010. № 2. С. 62–67.
5. Олейников А. М., Матвеев Ю. В., Солодкий А. В. Опыт конструирования автономной вертикально-осевой ветроэлектрической установки малой мощности // Водный транспорт. 2012. № 1 (13). С. 83–89.
6. Пат. 2693011 Российская Федерация, МПК Н 02 К 21/14. Бесколлекторный синхронный генератор модульного типа с постоянными магнитами / А. А. Татевосян. № 2018146967 ; заявл. 27.12.2018 ; опубл. 01.07.2019, Бюл. № 19. 12 с.
7. Татевосян А. А. Оптимизация тихоходного синхронного генератора модульного типа и принцип реализации системы управления напряжением генератора на основе нейронной сети // Электричество. 2021. № 7. С. 61–70. DOI 10.24160/0013-5380-2021-7-61-70.
8. Преобразователь частоты с открытой программной платформой MBS-FC01 // Мехатроника-ПРО. URL: <http://mechatronica-pro.com/ru/catalog/inverter/62> (дата обращения: 11.10.2023).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 378:004

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-69-72

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

### USING SYSTEM ANALYSIS TO OPTIMIZE BIG DATA PROCESSING

А. П. Афанасьев<sup>1</sup>, С. С. Колмогорова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова  
(Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия

A. P. Afanasev<sup>1</sup>, S. S. Kolmogorova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Petersburg State Electrotechnical University named after V.I. Ulyanov (Lenin) (LETI), Saint-Petersburg, Russia

**Аннотация.** Современные информационные технологии внесли изменения в способ сбора, хранения и обработки данных. В таких условиях традиционные подходы к обработке информации становятся малоэффективными. Для удобства работы с большими данными реализовано большое количество фреймворков и распределенных хранилищ данных. Одним из известных методов для поддержки выполнения крупномасштабных распределенных прикладных программ является MapReduce. В статье представлен обзор современных технологий, применяемых в области обработки больших данных, анализ рынка, а также сравнение современных аналитических систем управления базами данных.

**Ключевые слова:** системный анализ, большие данные, статистика, оптимизация, моделирование

**Abstract.** Modern information technologies have made changes in the way data is collected, stored and processed. As a result, there is an urgent problem of developing and applying new methods of approaches to data analysis. For the convenience of working with big data, a large number of frameworks and distributed data warehouses have been implemented. One of the well-known methods to support the execution of large-scale distributed application programs is MapReduce. The article presents an overview of modern technologies used in the field of big data processing, market analysis, as well as a comparison of modern analytical database management systems.

**Keywords:** system analysis, big data, statistics, optimization, modeling.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные информационные технологии изменили способ сбора, хранения и обработки данных. Использование системного анализа может помочь оптимизировать процесс обработки информации и повысить качество статистических исследований. Нынешняя стадия развития технологий характеризуется ростом объема информации и сложности структуры баз данных в различных областях человеческой деятельности. Однако в данных условиях установленные подходы к обработке информации не дают ожидаемого результата. В конечном итоге возникает актуальная проблема разработки и применения новых многометодных подходов к анализу данных.

Цель исследования состоит в изучении существующих методов оптимизации обработки больших данных с использованием системного анализа и разработкой рекомендации по использованию системного анализа для оптимизации обработки больших данных в статистической практике, а также создании единой методологии обработки данных.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для реализации поставленной цели проанализированы существующие методы оптимизации обработки больших данных на основе системного анализа и новых улучшенных методик оптимизации, основанных на системном подходе. При оптимизации обработки больших данных в статистике можно достичь повышения точности статистических моделей путем более эффективного использования методов системного анализа, что также позволит снизить ресурсоемкость и ускорить процесс анализа данных. Это будет способствовать значительному улучшению качества статистических исследований и развитию информационных технологий.

## III. ТЕОРИЯ

Человечество создает огромные объемы неструктурированных и структурированных данных. Ранее отсутствовали инструменты достаточной мощности и эффективности, которые способны собирать и обрабатывать большие объемы неструктурированных данных, с которыми мы сегодня сталкиваемся [1].

Современные организации, стремящиеся оставаться конкурентоспособными, вынуждены потреблять и обрабатывать огромные объемы данных. К этим большим данным относятся как структурированные электронные таблицы, так и различного рода неструктурированная информация: видео и аудиофайлы, изображения, данные с приборов и датчиков, а также многое другое [3].

Согласно данным за 2017 год, ведущими сферами в области применения технологии Big Data являются телекоммуникации и финансовые услуги. За ними следуют сферы информационных технологий и здравоохранения. Одним из основных вариантов применения технологии больших данных является прогнозное обслуживание и оптимизация хранилища данных [4].

Программно-технический комплекс сбора и обработки данных [5, 6] используется для безопасности человека и окружающих объектов.

Одним из основных инструментов системного анализа является моделирование. Моделирование позволяет создавать абстрактные представления системы, которые позволяют изучать ее свойства и взаимосвязи. В случае обработки больших данных, мы можем использовать модели для изучения зависимостей между различными переменными, определения оптимальных алгоритмов обработки данных и прогнозирования результатов.

В реальных условиях технической эксплуатации при работе с большими данными возникает необходимость в использовании специализированных платформ, где применяются различные подходы к извлечению, хранению и индексированию данных. Одним из хорошо известных методов для поддержки выполнения крупномасштабных распределенных прикладных программ является MapReduce. Для удобства работы с большими данными реализовано большое количество Фреймворков и распределенных хранилищ данных. При этом наиболее распространенной платформой, управляющей средами больших данных для пакетной обработки MapReduce, является Hadoop [7].

Модель MapReduce – это одна из основных технологий, применяемых в обработке больших данных. Принцип её работы основан на разделении исходного массива получаемой информации на разные части; параллельной обработке каждой из этих частей на собственном узле и последующего объединения всех выходных результатов.

Помимо прочего, существуют также библиотеки, направленные на использование методов машинного обучения в облаке, такие как MLlib от Spark [8].

В отличие от традиционного ядра Apache Hadoop, которое использует дисковое хранилище и двухуровневую концепцию MapReduce, Spark, в свою очередь, основывается на специализированных примитивах для обработки информации в оперативной памяти рекуррентным методом [2]. В результате существенно сокращается время, необходимое для принятия решения, многие задачи выполняются быстрее. Кроме того, эта технология позволяет более эффективно работать с алгоритмами машинного обучения.

Ещё одной СУБД, получившей значительную популярность, является ClickHouse от компании «Яндекс». Данная СУБД предлагает хранение и обработку значительных объемов информации для создания отчетов. Ее несомненным плюсом является простота масштабируемости и возможность ее использования системой с высокой нагрузкой. ClickHouse применяется во многих сервисах «Яндекса», начиная от «Метрики» и заканчивая «Почтой» [9].

Другим известным представителем СУБД является распределённая СУБД Greenplum, имеющая открытый исходный код. Она оптимизирована для аналитической обработки данных любого объема, а также для

создания больших масштабируемых надежных хранилищ. Архитектура Greenplum состоит из нескольких экземпляров объектно-реляционной базы данных PostgreSQL, которые работают в едином образе СУБД.

#### IV. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование рынка Big Data (рис. 1) выявило, что лидирующие в области использования технологии обработки больших данных – это, в первую очередь, сферы телекоммуникаций и финансовых услуг [10, с. 8]. В результате применение этой технологии большинство компаний получают выгоду в виде снижения расходов и появления новых возможностей для инвестиций.

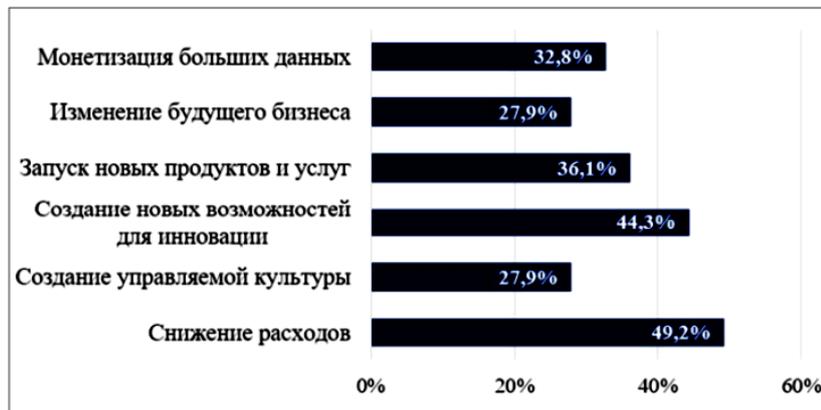


Рис. 1. Результаты внедрения технологии BigData

Проведенные исследования по поиску и изучению технологий в области обработки больших данных показали, что модель выполнения распределенных вычислений MapReduce, которая была разработана компанией Google, является одной из наиболее популярных технологий для обработки больших данных. В рамках этой схемы происходит обработка больших объемов данных в компьютерных кластерах [10, с. 8 ; 11, с. 38]. Также была рассмотрена аналитическая СУБД ClickHouse. Ее отличительная особенность – высокая скорость выполнения SQL-запросов на чтение. В некоторых областях применения ClickHouse может быть выгоднее относительно других систем ещё и с точки зрения эффективного использования ресурсов.

Суммированы все особенности рассмотренных СУБД и выделены оптимальные use-кейсы для каждой технологии (рис. 2).

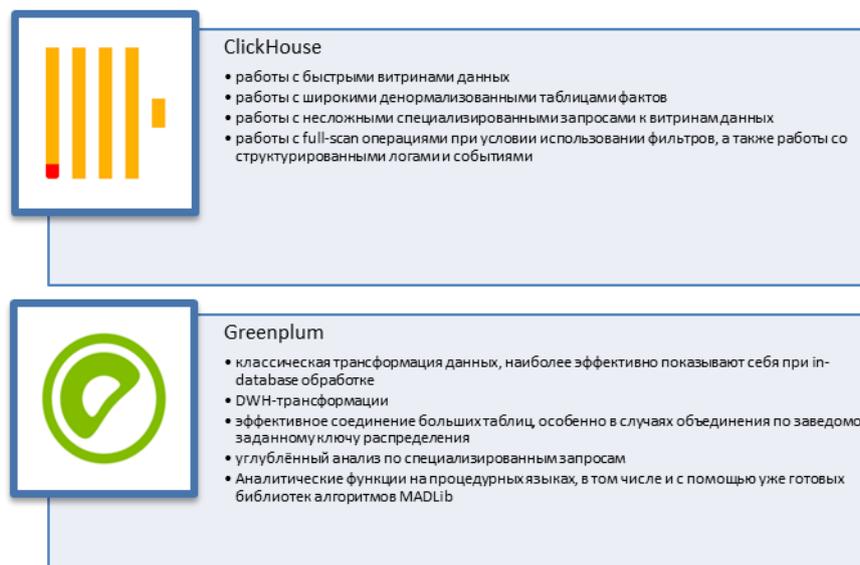


Рис. 2. Оптимальные use-кейсы для ClickHouse и Greenplum

#### VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системный анализ позволяет учитывать взаимосвязи между различными переменными и компонентами статистических данных. Это позволяет выявлять более точные и надежные результаты статистических исследований, что, в свою очередь, влияет на принятие решений и разработку политик на основе полученных данных. Вместе с тем с использованием системного анализа можно оптимизировать процессы сбора, хранения и обработки данных в статистике. Это позволяет сократить время и ресурсы, затрачиваемые на обработку информации, а также улучшить качество и достоверность получаемых результатов.

Научная новизна и теоретическая значимость работы заключаются в том, что исследование может способствовать развитию теории системного анализа и её применению в различных областях. Кроме того, результаты работы могут быть использованы для разработки новых улучшенных алгоритмов оптимизации обработки больших объёмов данных.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Научный руководитель Колмогорова Светлана Сергеевна, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smolan R., Erwit J. *The Human Face of Big Data*. Against All Odds Productions, 2012. 223 p.
2. Колмогорова С. С., Голубятникова Н. О. О применении регуляризации структуры больших данных для распределенной системы сбора и прогнозирования параметров объектов наблюдений // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2022. Т. 18, № 5. С. 91–99. DOI 10.36622/VSTU.2022.18.5.012.
3. Columbus L. 10 Charts That Will Change Your Perspective Of Big Data's Growth // *Forbes*. 2018. URL: <https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2018/05/23/10-charts-that-will-change-your-perspective-of-big-datas-growth/?sh=2260aa9a2926> (date accessed: 12.10.2023).
4. Dresner H. *Dresner Advisory Services Publishes 2018 Big Data Analytics Market Study* // *Dresner Advisory Services, LLC*. 2018. URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2018/12/20/1670374/0/en/Dresner-Advisory-Services-Publishes-2018-Big-Data-Analytics-Market-Study.html> (date accessed: 12.10.2023).
5. Колмогорова С. С., Колмогоров А. С., Баранов Д. С., Мокряк А. В. Платформа контроля электромагнитного поля для обеспечения безопасности труда и промышленных объектов // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 2. С. 58–63. DOI 10.24000/0409-2961-2022-2-58-63.
6. Колмогорова С. С., Романов Н. О. Профилирование системы сбора и обработки данных окружающей среды // *Приборы*. 2023. № 4(274). С. 14–18.
7. Dean J., Ghemawat S. *MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters* // *Operating System Design and Implementation (OSDI) : proceedings of the Symposium*. San Francisco, CA, USA. 2004. P. 137–150.
8. Franciscus N., Milosevic Z., Stantic B. *Influence of Parallelism Property of Streaming Engines on Their Performance* // *New Trends in Databases and Information Systems (ADBIS) : proceedings of the Prague*. Czech Republic : Springer, 2016. P. 104–111.
9. "Яндексе" открывает исходный код аналитической СУБД ClickHouse // *Открытые системы. СУБД*. 2016. № 3. С. 3–7а.
10. Nathan Martz, James Warren. *Big Data: Principles and Best Practices of Scalable Realtime Data Systems*. Simon and Schuster. 2017. 328 p.
11. Viktor Mayer-Schönberger, Kenneth Cukier. *Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think*. Bost : Houghton Mifflin Harcourt, 2014. 242 p.

УДК 378:004

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-73-80

**ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ЧЕБЫШЕВСКОГО ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА****ON THE STABILITY OF THE CHEBYSHEV ITERATIVE METHOD**Ю. Н. Захаров<sup>1</sup>, А. И. Зимин<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,  
г. Новосибирск, Россия<sup>2</sup>Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, РоссияY. N. Zakharov<sup>1</sup>, A. I. Zimin<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia<sup>2</sup>Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

**Аннотация.** Численное решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), особенно в случае нестационарных задач, занимает значительную долю машинного времени. Обычно для решения СЛАУ в пакетах прикладных программ используют или Чебышевский итерационный метод (волновые линейные задачи и др.), который требует задания оптимального параметра, или градиентные итерационные схемы, которые не требуют изначального знания оптимального итерационного параметра и самосопряженности матрицы системы. Для линейных систем уравнений Чебышевский метод является оптимальным по скорости сходимости (теоретически не улучшаемым) в случае, если матрица системы самосопряженная и положительно определенная. Единственным недостатком этого метода является необходимость знания границ спектра у решаемой матрицы уравнений. В настоящей работе происходит численная проверка устойчивости Чебышевского метода как в классическом варианте, так и в виде многошаговой схемы.

**Ключевые слова:** Чебышевская схема, многошаговая схема, численные методы, устойчивость к неточному заданию границ спектра

**Abstract.** Numerical solution of the systems of linear equations (linear system), especially in case of non-stationary problems, takes a significant part of computer time. Normally, for solving linear system the applied program packages use either Chebyshev iterative method (wave linear problems etc.), which requires setting the optimal parameter, or gradient iterative schemes, which do not require the initial setting of the optimal iterative parameter and the system matrix self-adjointness. For the systems of linear equations Chebyshev method is optimal in terms of convergence rate (theoretically not improvable) if the system matrix is self-adjoint and positively defined. The only downside of this method is the requirement to know the spectrum boundaries for the equations matrix being solved. This paper proposes the numerical test of the Chebyshev method stability both in classical variant and in the form of multistep scheme.

**Keywords:** Chebyshev scheme, multistep scheme, numerical methods, stability to the inexact setting of spectrum boundaries.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Прикладные задачи часто требуют решения больших систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), что может занимать значительную часть вычислительных ресурсов и времени. Например, если разностными методами решается задача о нестационарном течении вязкой или стратифицированной жидкости, то на каждом временном дискретном шаге приходится решать СЛАУ, получающуюся при разностной аппроксимации уравнения эллиптического типа, которая обычно имеет большую размерность. Итерационные методы решения СЛАУ делятся на две группы: со спектральной или вариационной оптимизациями итерационных параметров. Существует обширная литература, посвященная методам решения СЛАУ (обзор итераци-

онных методов решения СЛАУ, получающихся при аппроксимации уравнений эллиптического типа, приведен в [3, 19]), которая позволяет выбрать оптимальный метод для решения конкретной задачи. Но обычно при разработке пакетов прикладных программ (ППП) для решения СЛАУ используются градиентные методы, где итерационные параметры выбираются на каждом итерационном шаге из условия минимума квадратичного функционала, характеризующего погрешность решения системы. При этом для решения СЛАУ с самосопряженным оператором при известных границах спектра существует оптимальный метод – Чебышевский [19], с устойчивым набором итерационных параметров. Полностью вопрос об оптимальном упорядочивании параметров, являющихся функциями корней полинома Чебышева и обеспечивающих устойчивость схемы, был решен в работах А. А. Самарского, Е. С. Николаева [18, 19], В. И. Лебедева, С. А. Финогенова, Г. И. Марчука [14–17], которые предложили способ перемешивания итерационных параметров, обеспечивающий устойчивость схемы Ричардсона при любой длине цикла изменения параметров. Эту схему с правильно выбранными итерационными параметрами называют Чебышевским итерационным методом. Привлекательным в использовании этого метода является минимальное количество операций при оптимальной скорости сходимости. Так, например, при решении разностных схем, аппроксимирующих эллиптические уравнения явным Чебышевским методом, на одну итерацию требуется  $5 \cdot (N-1)^2$  арифметических операций и при этом гарантировано уменьшение начальной погрешности, исходя из полученной теоретической оценки сходимости ([19]). При использовании любого градиентного метода обязательно необходимо вычисление скалярных произведений для определения нового значения приближенного решения, и это приводит к увеличению арифметических операций как минимум в два раза.

Все перечисленные выше результаты были получены для случая, когда мы имеем точную информацию о границах энергетической эквивалентности операторов, входящих в итерационную схему.

К сожалению, у Чебышевского метода есть один существенный недостаток – он является неустойчивым к неточному заданию границ спектра, а определение спектральных границ в прикладных задачах требует дополнительных арифметических операций, при этом оно возможно лишь приближенно. При недостаточной точности вычисления границ возможно вообще не получить сходимости Чебышевского метода ([15, 19]). Это обстоятельство, несмотря на оптимальную оценку сходимости и небольшое количество арифметических операций при ее реализации, затрудняет использование Чебышевского метода в пакетах прикладных программ.

В [3] описан многошаговый метод, который имеет оценку сходимости как у Чебышевского метода, так есть фактически им и является, но использует другую информацию для своего построения.

Авторы, начиная с 2000 г., используют многошаговую схему для решения задач о течении идеальной стратифицированной жидкости [1–8], включая ее в комплексы программ [9–13] как решатель СЛАУ. Но до сих пор отдельно не приводилась численная оценка влияния неточно заданных границ спектра матрицы решаемой системы на сходимость многошагового метода. Поэтому целью данной работы является проверка влияния неточного задания границ спектра решаемой СЛАУ на сходимость Чебышевского итерационного метода [19] и многошаговой схемы [3].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### 4. Объект исследования

Пусть  $H$  – вещественное гильбертово пространство со скалярным произведением  $(u, v)$  и нормой  $\|u\| = (u, u)^{1/2}$ ,  $u, v \in H$ .

Для приближенного решения уравнения

$$Au = f,$$

где  $A$  – линейный положительно определенный самосопряженный оператор, заданный в  $H$ ,  $f$  и  $u$  – заданный и искомый векторы из  $H$ , рассмотрим итерационную схему

$$B_p \frac{u^{n+2p} - u^n}{\tau_0} + Au^n = f, \quad (1)$$

$$B_k = \frac{1}{1 + \omega_k} B_{k-1} (E + G_{k-1})^{-1}, \quad G_{k-1} = E - \tau_0 B_{k-1}^{-1} A, \quad \omega_k = \frac{\omega_{k-1}^2}{2 - \omega_{k-1}^2}, \quad k = \overline{1, p}, \quad B_0 = B(\tau_0), \quad \omega_0 = \rho_0.$$

где  $\tau_0$  – значение итерационного параметра одношаговой итерационной схемы Рундсона,  $\rho_0$  – норма оператора  $E - \tau_0 B^{-1} A$  одношаговой итерационной схемы Рундсона с итерационным параметром  $\tau_0$ .

Здесь  $\tau_0$  может быть как точным оптимальным ( $\tau_0 = \tau_*$ ), так и приближенным значением оптимального параметра одношаговой итерационной схемы, если  $\tau_0 \neq \tau_*$ , то  $\|S_0(\tau_0)\| = \rho_0 > \rho_*$ ,  $\rho_* = \|S_0(\tau_*)\|$ . Если значение  $\rho_0$  неизвестно, то можно использовать оценку  $\rho_b$  для  $\rho_0$  (см. [3]). В [3] также показано, что многошаговая схема является Чебышевской (то есть сходится оптимальным образом), если для построения схемы (1) используются точные значения границ спектра оператора  $A$  и он является самосопряженным.

### 5. Математическая модель

С целью проверки устойчивости к неточному заданию границы спектра численные эксперименты проводились на решении тестовых задачах, где известны границы спектра построенных операторов.

Рассмотрим уравнение Гельмгольца

$$-\Delta u - ku = f, \quad k \geq 0, \tag{2}$$

которое решается в области

$$\Omega = \{(x, y) \in R^2 : 0 < x < 1, 0 < y < 1\}$$

На ее границе ставится следующее граничное условие:

$$u(x, y)|_{\partial\Omega} = 0, \tag{3}$$

где граница  $\partial\Omega$  – это прямые линии, ограничивающие единичный квадрат.

Далее исходную дифференциальную задачу Дирихле (2), (3) аппроксимируем на квадратной сетке узлов

$$\Omega_h = \{x_i = x_{i-1} + h, \quad y_i = y_{i-1} + h, \quad i = \overline{1, N-1}\}$$

разностной схемой

$$-\left(\frac{u_{i+1j} - 2u_{ij} + u_{i-1j}}{h^2} + \frac{u_{ij+1} - 2u_{ij} + u_{ij-1}}{h^2} + ku_{ij}\right) = f_{ij}, \quad i, j = \overline{1, N-1}, \tag{4}$$

$$u_{0j} = 0, \quad u_{Nj} = 0, \quad u_{i0} = 0, \quad u_{iN} = 0, \quad i, j = \overline{0, N}.$$

Таким образом, для решения поставленной дискретной задачи необходимо решать систему линейных алгебраических уравнений

$$Au = f, \tag{5}$$

где  $A$  – пятидиагональная матрица системы,  $u$  – неизвестный вектор,  $f$  – известный вектор правой части (см. [19]).

### 6. Методы решения

СЛАУ (5) решалась двумя способами: явным Чебышевским итерационным методом с устойчивым набором параметров, обеспечивающим оптимальную оценку сходимости (см. [14, 19]), и явной многошаговой схемой (1), где  $B_0 = E$  (см. [3]).

Далее во всех таблицах приводится число итераций, полученных при решении СЛАУ представленными итерационными методами при выполнении условия установления итерационного процесса  $\|r^n\|/\|r^0\| \leq 10^{-5}$ ,  $r^n = A(u^n) - f$  – невязка. Решения получали на сетках с количеством узлов  $N$  от 20 до 200. Величина  $p$ , определяющая длину цикла итерационных параметров (см. [3]), изменялась от 1 до 9.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 1. Решение уравнения Пуассона

Для системы (5), которая аппроксимирует задачу Дирихле для уравнения Пуассона ( $k = 0$ ) спектральными границами полученной матрицы, являются числа  $\gamma_1 = 8/h^2 \sin^2(\pi h/2)$  и  $\gamma_2 = 8/h^2 \cos^2(\pi h/2)$ .

При точном задании границ спектра исходной матрицы  $A$  для обоих методов получили одинаковое число итераций до установления. Получающиеся в процессе решения наборы итерационных параметров также совпадают. Это свидетельствует о том, что рассмотренная многошаговая схема является Чебышевским методом, когда известны точные границы спектра матрицы  $A$ . В таблице 1 приведено полученное число итераций до установления для обоих методов.

ТАБЛИЦА 1

ЧИСЛО ИТЕРАЦИЙ ДО УСТАНОВЛЕНИЯ ОБОИХ МЕТОДОВ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА С ТОЧНО ЗАДАНЫМИ ГРАНИЦАМИ СПЕКТРА И ИТЕРАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

$p \setminus N$	20	40	60	80	100	120
1	930	3729	8395	14928	23327	33592
3	245	945	2113	3745	5845	8413
5	97	281	577	991	1513	2157
7	65	153	257	385	513	705
9	65	129	193	257	353	449

Далее был проведен анализ влияния на характер сходимости неточного задания границ спектра  $\gamma_1, \gamma_2$  при решении системы (5). Рассмотрим случай  $N = 80$ . При таком  $N$  границы спектра матрицы  $A$  равны  $\gamma_1 = 19.7366722374829$ ,  $\gamma_2 = 51180.2633277625$ .

Обозначим через  $\tilde{\gamma}_1$  и  $\tilde{\gamma}_2$  приближенные значения для  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . Были рассмотрены несколько вариантов выбора  $\tilde{\gamma}_1$  и  $\tilde{\gamma}_2$ . Оказалось, что при следующих вариантах этих величин:  $0 < \gamma_1 \leq \tilde{\gamma}_1 < \tilde{\gamma}_2 < \gamma_2$  и  $0 < \tilde{\gamma}_1 \leq \gamma_1 < \tilde{\gamma}_2 < \gamma_2$  Чебышевский метод расходится. Для него сходимость имеет место только при выполнении неравенства  $0 < \tilde{\gamma}_1 \leq \gamma_1 < \gamma_2 \leq \tilde{\gamma}_2$ .

Как показали наши расчеты, при точном задании нижней границы спектра любое уменьшение верхней границы спектра приводит к расходимости итерационного процесса. Аналогичный результат будем иметь при смещении всего спектра влево, то есть и в этом случае Чебышевский итерационный метод расходится.

При смещении целиком спектра вправо результаты те же, что и при увеличенном  $\tilde{\gamma}_2$  и точном  $\tilde{\gamma}_1$ : число итераций увеличивается и чем больше расширение, тем большее число итераций до установления. Таким образом, расширение спектра, не влияет на факт сходимости, а влияет только на скорость сходимости.

Далее приведем результат конкретного исследования влияния значений  $\tilde{\gamma}_1$  и  $\tilde{\gamma}_2$ , но уже на более мелкой сетке ( $N = 200$ ). Здесь величина  $p$ , определяющая длину цикла итерационных параметров, равна 3. В этом случае  $\gamma_1 = 19.7388029342943$ ,  $\gamma_2 = 319980.261197066$ .

ТАБЛИЦА 2  
 ЧИСЛО ИТЕРАЦИЙ ДО УСТАНОВЛЕНИЯ ЧЕБЫШЕВСКОГО МЕТОДА ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА С НЕТОЧНО ЗАДАНЫМИ ГРАНИЦАМИ СПЕКТРА ( $p = 3, N = 200$ )

$\tilde{\gamma}_1 > \gamma_1$	$0.2 \cdot \gamma_2$	$0.4 \cdot \gamma_2$	$0.6 \cdot \gamma_2$	$0.8 \cdot \gamma_2$
	83457	118031	144560	166924
$\tilde{\gamma}_1 < \gamma_1$	$0.8 \cdot \gamma_1$	$0.6 \cdot \gamma_1$	$0.4 \cdot \gamma_1$	$0.2 \cdot \gamma_1$
	11641	11657	11665	11681
$\tilde{\gamma}_2 > \gamma_2$	$1.5 \cdot \gamma_2$	$2 \cdot \gamma_2$	$2.5 \cdot \gamma_2$	$3 \cdot \gamma_2$
	17525	23357	29190	35023
$\tilde{\gamma}_2 < \gamma_2$	$0.99 \cdot \gamma_2$	$0.995 \cdot \gamma_2$	$0.997 \cdot \gamma_2$	$0.999 \cdot \gamma_2$
	расходится	расходится	расходится	11689

При одновременном изменении обеих границ результаты те же, что и при изменении верхней границы.

Если проделать аналогичные расчеты для многошаговой схемы, то она продолжает сходиться при произвольном задании нормы оператора шага и итерационного параметра. Некоторые результаты приведены в таблице 3. Здесь количество узлов сетки  $N = 80$ , величина  $p$ , характеризующая длину цикла итерационных параметров, равна 3. Оптимальный итерационный параметр  $\tau_*$  и норма оператора шага  $\rho_*$  в этом случае имеют значения:  $\tau_* = 3.90625 \cdot 10^{-5}$ ,  $\rho_* = 0.999229036240723$ .

ТАБЛИЦА 3  
 ЧИСЛО ИТЕРАЦИЙ ДО УСТАНОВЛЕНИЯ МНОГОШАГОВОЙ СХЕМЫ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА С НЕТОЧНО ЗАДАНЫМИ ИТЕРАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРОМ И НОРМОЙ ОПЕРАТОРА ШАГА ( $p = 3, N = 80$ )

$\tau_0 \setminus \rho_0$	0.1	0.5	0.9	0.99	0.999
0.000031	18717	16289	8197	3233	2417
0.000033	17583	15302	7700	3041	2269
0.000035	16578	14427	7258	2865	2137
0.000037	15681	13647	6865	2705	2017
0.000039	14877	12947	6513	2569	1913

Из таблиц видно, что норма  $\rho_0$  может быть задана практически любой в пределах от 0 до 1 и расходимости нет. Аналогичная ситуация имеет место и для системы большей размерности.

Результаты проведенных расчетов для сетки  $N = 200$  приведены в таблице 4. Здесь  $p = 3$ ,  $\tau_* = 6.249 \cdot 10^{-6}$ ,  $\rho_* = 0.999877$ ,  $\gamma_1 = 19.7388029342943$ ,  $\gamma_2 = 319980.261197066$ .

ТАБЛИЦА 4  
 ЧИСЛО ИТЕРАЦИЙ ДО УСТАНОВЛЕНИЯ МНОГОШАГОВОЙ СХЕМЫ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА С НЕТОЧНО ЗАДАНЫМИ ИТЕРАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРОМ И НОРМОЙ ОПЕРАТОРА ШАГА ( $p = 3, N = 200$ )

$\tau_0 \setminus \rho_0$	0.1	0.5	0.9	0.95	0.99	0.999
0,0000062	93598	81465	41039	29693	16293	12217
0,00000621	93447	81333	40973	29645	16265	12197
0,00000622	93297	81203	40905	29597	16241	12177
0,00000623	93147	81073	40841	29549	16217	12158
0,00000624	92998	80943	40777	29503	16186	12137
0,00000625	92849	80813	40711	29456	16161	12121

2. Решение СЛАУ с недиагональной матрицей

Далее для случая с незнакоопределенным оператором рассмотрим разностную задачу (4) с параметром  $k$ , равным 1500. В этом случае матрица  $A$  системы (5) является незнакоопределенной.

Собственные значения получающегося оператора  $A$  известны (см. [19]):

$$\lambda_{ij} = \frac{4}{h^2} \sin^2 \frac{i\pi h}{2} + \frac{4}{h^2} \sin^2 \frac{j\pi h}{2} - k, \quad i, j = \overline{1, N-1}$$

и заключены на отрезках  $[\gamma_{11}, \gamma_{12}]$  и  $[\gamma_{21}, \gamma_{22}]$ ,  $\gamma_{12} < 0 < \gamma_{21}$ .

Тогда границы шага оператора  $\bar{C} = C^2 - 2\alpha C$  явной схемы легко могут быть найдены (см. [19]):

$$\gamma_1 = -\gamma_{12}\gamma_{21}, \quad \gamma_2 = \max[\gamma_{22}(\Delta_2 - \Delta_1), \gamma_{11}(\Delta_2 - \Delta_1)] - \gamma_{11}\gamma_{22}, \quad \Delta_1 = \gamma_{12} - \gamma_{11}, \quad \Delta_2 = \gamma_{22} - \gamma_{21}.$$

И снова, как и при решении уравнения Пуассона, при точном задании  $\gamma_1, \gamma_2$  для обоих методов были получены одинаковые результаты (см. таблицу 5).

ТАБЛИЦА 5  
ЧИСЛО ИТЕРАЦИЙ ДО УСТАНОВЛЕНИЯ ОБОИХ МЕТОДОВ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ( $k = 1500$ ) С ТОЧНО ЗАДАНЫМИ ГРАНИЦАМИ СПЕКТРА И ИТЕРАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

$p \setminus N$	40	60	80	100
1	643	3933	12795	31637
2	305	1945	6365	15777
3	121	937	3137	7833
4	-	401	1505	3841
5	-	161	641	1793
6	-	-	-	641

Далее представлено исследование влияния на сходимость неточного задания границ спектра  $\tilde{\gamma}_1$  и  $\tilde{\gamma}_2$ .

При  $N = 80$  границы спектра равны:  $\gamma_1 = 475.62038225$ ,  $\gamma_2 = 2467469176.3$ . Далее во всех случаях величина  $p$ , определяющая длину цикла итерационных параметров, равна 5. В таблице 6 приведено число итераций при различных  $\tilde{\gamma}_1$  и  $\tilde{\gamma}_2$ .

ТАБЛИЦА 6  
ЧИСЛО ИТЕРАЦИЙ ДО УСТАНОВЛЕНИЯ ЧЕБЫШЕВСКОГО МЕТОДА ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ( $k = 1500$ ) С НЕТОЧНО ЗАДАНЫМИ ГРАНИЦАМИ СПЕКТРА ( $p = 5, N = 80$ )

$\tilde{\gamma}_1 > \gamma_1$	$0.2 \cdot \gamma_2$	$0.4 \cdot \gamma_2$	$0.6 \cdot \gamma_2$	$0.8 \cdot \gamma_2$
	11417	16177	расходится	расходится
$\tilde{\gamma}_1 < \gamma_1$	$0.8 \cdot \gamma_1$	$0.6 \cdot \gamma_1$	$0.4 \cdot \gamma_1$	$0.2 \cdot \gamma_1$
	641	641	641	641
$\tilde{\gamma}_2 > \gamma_2$	$1.5 \cdot \gamma_2$	$2 \cdot \gamma_2$	$2.5 \cdot \gamma_2$	$3 \cdot \gamma_2$
	1025	1409	1825	2209
$\tilde{\gamma}_2 < \gamma_2$	$0.99 \cdot \gamma_2$	$0.995 \cdot \gamma_2$	$0.997 \cdot \gamma_2$	$0.999 \cdot \gamma_2$
	расходится	расходится	641	641

При одновременном изменении обеих границ результаты те же, что при изменении верхней границы.

Далее по аналогии, была проведена серия расчетов многошаговой схемой, где норма оператора шага  $\rho_0$  и итерационный параметр  $\tau_0$  задавались произвольно. Некоторые результаты приведены в таблице 7. Здесь  $p = 3, N = 80, \tau_* = 8.10546949764801 \cdot 10^{-10}, \rho_* = 0.99999961448735$ .

ТАБЛИЦА 7

ЧИСЛО ИТЕРАЦИЙ ДО УСТАНОВЛЕНИЯ МНОГОШАГОВОЙ СХЕМЫ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ( $k = 1500$ ) С НЕТОЧНО ЗАДАНЫМИ ИТЕРАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРОМ И НОРМОЙ ОПЕРАТОРА ШАГА ( $p = 3, N = 80$ )

$\tau_0 \setminus \rho_0$	0.1	0.5	0.9	0.91	0.99	0.999
$7.5 \cdot 10^{-10}$	13757	11961	6273	6177	3825	3513
$7.7 \cdot 10^{-10}$	13401	11649	6113	6017	3729	3425
$7.9 \cdot 10^{-10}$	13057	11353	5953	5865	3633	3337
$8.1 \cdot 10^{-10}$	12737	11073	5801	5713	3545	3249

Как видно из таблицы 7, все выявленные тенденции сходимости и расходимости при решении СЛАУ с положительно определенным оператором имеют место и в случае СЛАУ с незнакоопределенным оператором.

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проделанные численные эксперименты (большая их часть не входит в эту статью из-за ограничения по ее объему) показали, что при точном задании исходной информации о границах спектра матрицы системы наборы итерационных параметров и, следовательно, число итераций до установления обоих методов совпадают.

Для Чебышевского итерационного метода можно отметить следующую закономерность (см. таблицы 2, 6):

- 1) при уменьшении верхней границы хотя бы на 1% метод расходится (когда  $\gamma_1$  точное);
- 2) смещение всего использованного приближенного спектра вправо дает те же результаты, что и при увеличении  $\tilde{\gamma}_2$  (когда  $\gamma_1$  точное), то есть число итераций увеличивается;
- 3) использование сдвига спектра влево приводит к тем же результатам, что и при уменьшении  $\tilde{\gamma}_2$  (когда  $\gamma_1$  точное), то есть метод расходится;
- 4) расширение спектра одновременно вправо и влево только увеличивает число итераций до установления.

В отличие от классического варианта Чебышевского итерационного метода (см. [14, 16 – 19]) многошаговая схема ([3]) не только сходится при точном задании границ спектра, как и Чебышевский метод, но при этом устойчива к неточному заданию как итерационного параметра, так и нормы оператора одношаговой схемы Ричардсона (см. таблицы 3, 4, 7).

#### V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали многочисленные тестовые расчеты, а также практика использования многошаговой схемы в наших прикладных пакетах при решении нестационарных течений стратифицированной идеальной жидкости, многошаговая схема ([3]) позволяет достаточно эффективно решать разнообразные краевые задачи даже при использовании грубых оценок границ спектра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарева Л. В., Захаров Ю. Н. Моделирование процесса очистки промышленных стоков с помощью затопленных горных выработок // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2014. Т. 1. С. 122–127.
2. Васильев А. С., Захаров Ю. Н. Применение итерационных схем при решении задач о движении стратифицированной жидкости // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11, № 53. С. 45–52.
3. Захаров Ю. Н. Градиентные итерационные методы решения задач гидродинамики : моногр. Новосибирск : Наука, 2004. 238 с. ISBN: 5-02-032415-9.
4. Захаров Ю. Н., Лобасенко Р. Б., Рагулин В. В. Математическое моделирование нестационарных мембранных процессов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2004. № 10. С. 16–18.
5. Захаров Ю. Н. Дифракция волн в закрытых бухтах // Вестник Кемеровского государственного университета. 2008. № 2 (34). С. 57–60.

6. Захаров Ю. Н., Счастливец Е. Л., Чирюкина А. В. Течение идеальной жидкости в закрытых водоемах // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13, вып.2. С. 21–27.
7. Захаров, Ю. Н. Численное решение трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса в переменных «вихрь-векторный потенциал» / Ю. Н. Захаров, К. С. Иванов // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13 С. 159–166.
8. Захаров Ю. Н., Потапов В. Н., Счастливец Е. Л., Чирюкина А. В. Нестационарное распространение примесей в затопленных шахтах // Горный информационный аналитический бюллетень. 2009. № S7. С. 205–208.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611938 Российская Федерация. Программный комплекс для инженерного проектирования гидротехнических сооружений „DirtFlow“ / Ю. Н. Захаров, Е. Л. Счастливец, В. П. Потапов, А. В. Чирюкина ; опубли. 15.03.2010.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613160 Российская Федерация. Программный комплекс для инженерного проектирования гидротехнических сооружений „Wave Diffraction in Closed Bays“ / Ю. Н. Захаров, Е. В. Полторацкая ; опубли. 2010.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011612543 Российская Федерация. Программный комплекс для инженерного проектирования гидротехнических сооружений „Flow Produced by Given Pressure Drop“ / Ю. Н. Захаров, Н. А. Гейдаров ; опубли. 2011.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617179 Российская Федерация. Программное средство расчета теплотехнических параметров котлов вихре-петлевого типа / Ю. Н. Захаров, Н. А. Гейдаров, Д. А. Желнерович, М. С. Никитенко : опубли. 2012.
13. Пат. 2506991 Российская Федерация, МПК В01D 63/06(2006.01). Аппарат для мембранного концентрирования» / Ю. Н. Захаров, Б. А. Лобасенко, А. С. Шушпанников, А. Г. Семенов. № 2012138966/05 ; заявл. 11.09.2012 ; опубли. 20.02.2014.
14. Лебедев В. И., Финогенов С. А. О порядке выбора итерационных параметров в Чебышевском циклическом итерационном методе // Вычислительная математика и математическая физика. 1971. Т. 11, № 2. С. 425–438.
15. Лебедев В. И., Финогенов С. А. Об устойчивости в Чебышевских итерационных процессах // Вычислительные методы линейной алгебры. 1973. С. 42–47.
16. Лебедев В. И., Забелин В. В. Об одном итерационном алгоритме с Чебышевскими параметрами // Препринт. 1988. № 207. С. 30
17. Марчук Г. И., Лебедев В. И. Численные методы в теории переноса нейтронов. М. : Атомиздат, 1971. 496 с.
18. Николаев Е. С., Самарский А. А. Выбор итерационных параметров в методе Рундсона // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1972. Т. 12, № 4. С. 960–973.
19. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. М. : Наука, 1989. 592 с.

УДК 004.42

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-81-84

## ОТСЛЕЖИВАНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ДОРОГ ПРИ ПОМОЩИ ANDROID-СМАРТФОНА

### TRACKING ROAD IRREGULARITIES USING AN ANDROID-SMARTPHONE

М. И. Кано

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

M. I. Kano

*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

**Аннотация.** В целях улучшения качества дорожного покрытия, а также повышения качества логистики, ускорения грузоперевозок, повышения уровня сохранности перевозимых грузов и уменьшения количества дорожно-транспортных происшествий, автором было проведено исследование доступных средств для отслеживания неровностей дорог. Проведенный опрос среди автомобилистов показал, что пользователи автомобилей не имеют доступа к источникам о неровностях дорожного покрытия или не знают про доступные источники информации о качестве и особенностях дорожного покрытия, а также хотели бы иметь общедоступный источник такой информации. Наличие неровностей на дорожном покрытии, по которому проходит маршрут следования автомобиля или грузового транспорта, увеличивает время прохождения маршрута и риск повреждения грузов, перевозимых транспортом. Для уменьшения количества дорожно-транспортных происшествий и повреждений доставляемых грузов наземным транспортом было разработано приложение для Android-смартфона, позволяющее получить информацию о неровностях на дорогах посредством маркеров, установленных на карте, а также приложение позволяет пользователю отследить неровности для увеличения охвата отслеженных неровностей.

**Ключевые слова:** дорожное покрытие, логистика, неровности дорог, особенности дорог, источники информации.

**Abstract.** In order to improve the quality of the road surface, as well as improve the quality of logistics, speed up cargo transportation, increase the level of safety of transported goods and reduce the number of road accidents, the author conducted a study of available means for monitoring road irregularities. A survey among motorists showed that car users do not have access to sources about road surface unevenness or do not know about available sources of information about the quality and features of the road surface, and would also like to have a publicly available source of such information. The presence of unevenness on the road surface along which the route of a car or truck passes increases the time it takes to complete the route and the risk of damage to goods transported by transport. To reduce the number of road accidents and damage to goods delivered by ground transport, an application for Android smartphones was developed that allows you to obtain information about bumps on the roads through markers installed on the map, and the application also allows the user to track bumps to increase the coverage of tracked bumps.

**Keywords:** road surface, logistics, road irregularities, road features, sources of information.

#### I. ВВЕДЕНИЕ

Ввиду наличия непостоянного качества дорожного покрытия и наличия его особенностей и неосведомленности водителей об этом, существуют определенные риски для участников дорожного движения:

- Повреждения важных частей транспортного средства из-за взаимодействия автомобиля с неровностью дорожного покрытия на высокой скорости, например, подвеска автомобиля.

- Возникновение дорожно-транспортных происшествий из-за потери управляемости транспортным средством ввиду взаимодействия автомобиля с неровностями дорожного покрытия.
- Повреждение грузов при транспортной перевозке.

Анализ проведенного опроса среди пользователей транспортных средств показал, что водители не имеют знаний о наличии источников о состоянии дорожного покрытия на пути их следования, а также выражают желание иметь подобный источник. Поиск аналогов подобных работ показал, что на текущий момент таких не существует. Таким образом, была составлена актуальность данной работы.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Была поставлена следующая задача после определения актуальности работы: разработка приложения для отслеживания неровностей дорог и возможности пользователей автомобильного транспорта получения информации о неровностях и особенностях дорожного покрытия на пути их следования.

## III. ТЕОРИЯ

Модель сбора информации: отслеживание наезда на неровность происходит в реальном времени при помощи акселерометра, а местоположение неровности определяется как местоположение пользователя в момент наезда на неровность при помощи GPS-датчика; все датчики встроены в Android-смартфон. При наезде на неровность вертикальное ускорение автомобиля и, соответственно, смартфона, неподвижно закрепленного внутри автомобиля, изменяется. Акселерометр измеряет ускорение смартфона по вертикальной оси, в то время как GPS-датчик определяет координаты неровности, после чего данные с датчиков собираются и отправляются на обработку. При помощи мощностей Android-смартфона данные обрабатываются и составляется разность ускорения между двумя моментами времени. В зависимости от величины разности ускорения неровности подразделяются на четыре категории величины неровности и в соответствии с ними на карте, расположенной на экране смартфона, устанавливается определенный маркер, обозначающий наличие неровности.

Модель передачи данных от пользователя к пользователю: после сбора информации от датчиков об отслеженной неровности, Android-смартфон, при возможности и наличии Интернет-связи, отправляет данные на внешний сервер, доступ к которому имеют все пользователи приложения. Внешний сервер передает данные на сервер базы данных, разработанный при помощи системы управления базой данных PostgreSQL [1], который записывает данные в базу данных для дальнейшей передачи информации об уже отслеженных неровностях остальным пользователям по их запросу.

Модель информирования пользователей о неровностях дорог: пользователи информируются о неровностях дорог при помощи графических элементов на карте. Приложение создает запрос на базу данных о получении информации о неровностях дорог, затем, после получения информации, Android-смартфон устанавливает маркеры на карте в соответствии с координатами и градацией неровностей.

Модель защиты данных: для защиты данных о неровностях используется специальный внешний сервер, представляющий из себя передатчик информации о неровностях между пользователем и сервером базы данных. Таким образом, пользователи имеют доступ лишь к внешнему серверу, который имеет гибкие настройки по фильтрации запросов, передаваемых на сервер базы данных, но не имеют доступа к серверу базы данных.

Модель внешнего сервера: внешний сервер использует внутренние инструменты библиотеки Socket языка программирования Java [2], при помощи которых сервер принимает и отправляет данные на устройство пользователя.

Модель пользовательского приложения: приложение использует внутренние инструменты библиотеки Socket языка программирования Java [2] для принятия и отправки данных на внешний сервер, внешнюю библиотеку OpenStreetMaps [3] для использования графической карты и создания маркеров на карте, для обозначения местоположения неровностей, а также стандартные инструменты языка программирования Java для разработки приложений для Android-смартфона [4], для реализации переключателей функций приложения по отслеживанию и перемещению карты к пользователю и к отслеженной неровности.

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для тестирования приложения было выбрано два автомобиля – Suzuki Grand Vitara 2004 года производства и Hyundai Tucson 2008 года производства. Тестирование двух автомобилей проводилось на одинаково-

вом участке дороги с одинаковыми скоростями с использованием одной модели Android-смартфона. Результаты замеров неровностей различались – ускорение на автомобиле Suzuki Grand Vitara по вертикальной оси на неровностях больше, чем на автомобиле Hyundai Tucson на том же участке дороги с теми же неровностями. На данных автомобилях установлены различающиеся задние ходовые части – задняя ходовая часть автомобиля Suzuki Grand Vitara имеет зависимую многорычажную подвеску, в то время как Hyundai Tucson имеет заднюю ходовую часть, состоящую из независимой многорычажной подвески. На основании этих данных был сделан вывод, что текущий алгоритм замера неровностей имеет зависимость измерения от технических характеристик транспортного средства и требует доработки для учета особенностей строения автомобиля.

Также в результате тестирования были определены следующие недостатки текущего приложения для отслеживания неровностей: слишком частый опрос акселерометра, из-за чего возможна замена маркера на карте, который не соответствует действительной классификации неровности; зависимость от состояния внешнего сервера – в условиях недоступности внешнего сервера приложение не может сохранить полученные данные, из-за чего эти данные уничтожатся при закрытии приложения.

## V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На текущий момент были разработаны клиентское приложение и внешний сервер; приложение имеет свой графический интерфейс, состоящий из карты, отмеченных маркерами неровностей, трех переключателей, при помощи которых пользователь приложения может выбирать необходимые ему функции: включить или отключить перемещение карты по направлению пользователя, включить или отключить возможность отслеживать неровности и включить или отключить перемещение карты к отслеженной неровности. Также в приложении есть возможность просмотреть дополнительную информацию, касающуюся использованных библиотек и инструментов. Само приложение в автоматическом режиме и при наличии Интернет-сети отправляет данные об отслеженных неровностях на внешний сервер в момент, когда была отслежена та или иная неровность, но не имеет функционала сохранения информации на память Android-смартфона. Графический интерфейс приложения представлен на рис. 1.

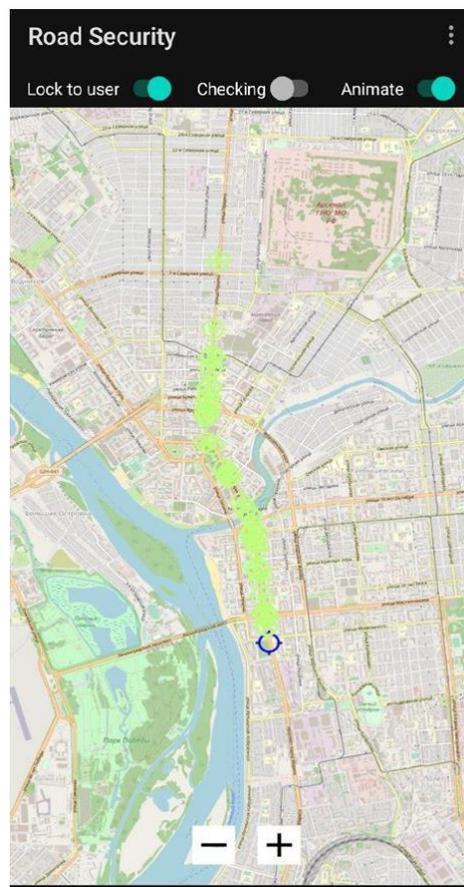


Рис. 1. Пользовательский интерфейс приложения

Был разработан внешний сервер, позволяющий обслужить одного пользователя в определенный момент времени (т.е. сервер является однопоточным). Сам внешний сервер может принимать данные от приложения на пользовательском Android-смартфоне, но, ввиду отсутствия связи между внешним сервером и базой данных, на текущий момент данные об отслеженных неровностях не сохраняются в базу данных.

Также был проведен SWOT-анализ проекта.

Преимущества проекта состоят из отсутствия конкурентов; доступности услуг ввиду наличия одного технического требования – наличие Android-смартфона; высокая скорость составления прогноза при достаточном количестве пользователей.

Недостатки проекта состоят из сложности определения точности измерений, так как для этого необходимо провести тестирование множества Android-устройств на одном и том же участке дороги в одних и тех же условиях; также есть возможный риск непредоставления услуг, или недостаточной точности измерений, или непостоянное обновление данных в областях дорог, где нет пользователей приложения.

Возможности проекта состоят из проведения испытаний приложения на многочисленных устройствах для повышения точности измерений, а также есть возможность более широкого охвата рынка при востребованности проекта среди пользователей иных операционных систем мобильных устройств.

Угрозы состоят из возможного появления конкурентов на рынке.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект является перспективным для предоставления услуг для транспортных компаний ввиду их заинтересованности в сохранности груза, на что влияет качество и безопасность дороги по маршруту следования автомобиля. Также проект нуждается в доработке с использованием внешних библиотек для более стабильного и точного предоставления услуг по отслеживанию неровностей и передаче данных об отслеженных неровностях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) PostgreSQL 16.1 Documentation. URL: <https://www.postgresql.org/docs/current/> (date accessed: 12.10.2023).
- 2) Java Documentation. URL: <https://docs.oracle.com/en/java/> (date accessed: 12.10.2023).
- 3) Электронный ресурс Github; Документация к библиотеке OpenStreetMap для Android-смартфонов - <https://github.com/osmdroid/osmdroid/wiki> по ссылке Osmdroid. URL: <https://github.com/osmdroid/osmdroid/wiki> (date accessed: 12.10.2023).
- 4) Develop for Android. URL: <https://developer.android.com/docs> (date accessed: 12.10.2023).

УДК 378:004

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-85-90

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ СКЛЕРОМЕТРИИ ЦИРКОНЕВЫХ МАГНЕТРОННЫХ ПОКРЫТИЙ

## MODELING OF THE STRESS STATE DURING SCLEROMETRY OF ZIRCONIUM MAGNETRON COATINGS

Д. В. Постников, Э. А. Ткаченко, А. А. Теплоухов  
*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

D. V. Postnikov, E. A. Tkachenko, A.A. Teploukhov  
*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

**Аннотация.** При определении силы адгезии покрытий, нанесенных магнетронным методом, разработана математическая модель, позволяющая на основе расчета внутренних напряжений определить силу адгезии без эталонных образцов. Предложенная расчетная модель с применением принципа суперпозиции от нескольких точечных источников напряжений позволила объяснить характер отслаивания за счет возникновения растягивающих напряжений по глубине образца.

**Ключевые слова:** Модель и численный расчет напряженного состояния, адгезия

**Abstract.** When determining the adhesion force of coatings deposited by the magnetron method, a mathematical model has been developed that allows, based on the calculation of internal stresses, to determine the adhesion force without reference samples. The proposed calculation model using the principle of superposition from several point stress sources made it possible to explain the nature of peeling due to the occurrence of tensile stresses along the depth of the sample.

**Keywords:** Model and numerical calculation of stress state, adhesion.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнетронное напыление в последнее время стало одним из ключевых методов нанесения тонких пленок, которые широко используются в электронике [1], в оптике, при создании металлических контактов и в других областях техники [2,3]. Определяющей характеристикой оценки качества покрытия является его прочность сцепления с поверхностью образца или так называемая предельная сила адгезии, приходящаяся на единицу площади (сила адгезии или прочность сцепления). Актуальность проведенного исследования заключается в том, что определение силы адгезии свидетельствует о пригодности покрытия во время эксплуатации изделия при заданных условиях работы, а также о его долговечности.

В настоящее время применяется несколько способов измерения силы адгезии: механических и немеханических. При этом необходимо иметь в виду, что существующие методы не являются в достаточной степени точными [4, 5]. В проведенной работе для оценки эксплуатационных характеристик нанесенных покрытий использовался метод склерометрии, который является одним из наиболее доступных способов.

В склерометрическом методе исследования проводится нанесение царапины (следа) твердым индентором на поверхность тонкопленочного покрытия (проведение scratch-теста) [6, 7]. Значения твердости и силы адгезии в этом методе определяются по ширине и глубине следа с учетом нормальной нагрузки, приложенной на индентор [8, 9, 10]. Способы определения адгезионных характеристик, которые описаны в работах [11, 12], носят лишь оценочный характер. Обычно оценка проводится путем сравнения с некоторой известной так называемой эталонной характеристикой. Особенно затруднителен метод для новых материалов и покрытий, для которых не разработаны эталоны, поэтому эффективно использовать численное моделирование напряженного состояния при воздействии индентора и на основании результатов математического моделирования и растровой электронной микроскопии следов индентора определить величину силы адгезии.

В настоящей работе в целях получения наиболее четкого представления физической картины и более точной оценки прочности сцепления при воздействии на тонкопленочное покрытие сферического индентора проводилось численное физико-математическое моделирование распределения по поверхности образца внутренних напряжений. Модельные расчеты проводились на ЭВМ по принципу суперпозиции большого числа точечных источников механических напряжений.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ПРИ СКЛЕРОМЕТРИИ

В этом методе индентор конической формы с приложенной нормальной нагрузкой движется вдоль покрытой поверхности. Величина нагрузки  $P$  непрерывно или ступенчато увеличивается до момента отрыва разрушения покрытия. Необходимо отметить, что значение твердости покрытия определяется по ширине царапины по эмпирической формуле:

$$H = \frac{P}{kb^2}, \quad (1)$$

где  $b$  – усредненное значение ширины следа, м;  $k$  – коэффициент, зависящий от формы наконечника индентора (коэффициент формы индентора). Коэффициент формы  $k$  определялся при нанесении следа индентора на эталон по методу Виккерса. Нормальная сила  $P$ , необходимая для разрушения покрытия, также называется критической нагрузкой. Ее измерение производится для сравнения адгезии системы покрытие-подложка с эталонной системой подобного типа [13].

Основная задача метода склерометрии при оценке адгезионных характеристик покрытия – установление точной взаимосвязи между измеренной критической нагрузкой, микрофотографией характера разрушения и фактической прочностью адгезии  $\sigma_{max}$ . Разновидности разрушения покрытий могут быть разные. Самый распространенный вид повреждения: отслоение покрытия перед индентором из-за того, что индуцированное напряжение сжатия или растяжения превышает критическое значение. Таким образом, сила адгезии может зависеть от способа механического воздействия на поверхность, а также от скорости движения индентора, скорости увеличения нагрузки, радиуса наконечника индентора и его износа, от твердости подложки, толщины покрытия, коэффициента трения и остаточных напряжений [14]. Также могут возникать различные неадгезионные повреждения во время нанесения царапины.

Исследуемые циркониевые покрытия на поверхности стали наносились с помощью установки магнетронного напыления VSM 200 "ADVAC" с системой напуска газа и с измерителем толщины покрытия. Подготовка поверхности к магнетронному нанесению покрытия проводилась в следующем порядке:

1) очистка от окислов, шлифовка и полировка, при этом шероховатость обрабатываемых рабочих поверхностей должна быть не ниже значения  $Ra=1,25$  (качество покрытия улучшается с повышением чистоты поверхности);

- 2) промывка образца в бензине;
- 3) промывка в УЗГ при частоте  $\nu=4$  кГц, время  $t=4$  мин;
- 4) протирка камеры напыления;
- 5) загрузка и вакуумирование;
- 6) ионная очистка поверхности в тлеющем разряде с целью удаления окислов;
- 7) ионно-плазменное магнетронное нанесение слоя циркония.

Ионная очистка в тлеющем разряде велась при напряжении порядка 100 В и силе тока 0.32 А. При очистке давление в камере поддерживалось  $6.63 \cdot 10^{-3}$  Па. Напыление проводилось при температуре  $50^\circ\text{C}$  в течение 30 минут. Толщина покрытия по откалиброванному датчику толщины составила 1.2 мкм.

Проведение склерометрического scratch-теста осуществлялось при различных силовых нагрузках на индентор из твердосплавного наконечника диаметром 40 мкм. Микрофотографии поверхности после проведения scratch-теста представлены на рис. 1. В соответствии с методикой, механическое напряжение, возникающее при нанесении царапины в момент воздействия, определялось по формуле:

$$\sigma_{инд} = \frac{F_c}{S_c}, \quad (2)$$

где  $F_c$  – силовая нагрузка на индентор,  $S_c$  – площадь контакта индентора с испытываемой поверхностью.

Зависимость напряжения от силовой нагрузки представлена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1  
ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ СИЛОЙ И НАПРЯЖЕНИЯМИ ПРИ СКЛЕРОМЕТРИИ

$F_c$ (Н)	$\sigma_{инд} \cdot 10^6$ Н/м <sup>2</sup>
0.10	79.5
0.20	159.3
0.40	318.4
0.50	398.2
0.70	557.2

Микрофотографии были получены на растровом электронном микроскопе Jeol JCM-5700. На представленных микрофотографиях рис. 1 наблюдается преимущественное адгезионное разрушение покрытия, т.е. адгезив (или покрытие) целиком отделилось от субстрата. При этом следы когезионного разрушения практически отсутствуют, разрыв прошел по массиву покрытия или подложки. Также очевидно, что ширина отслоения существенно превышает ширину части наконечника индентора, углубленную в циркониевое покрытие. По микрофотографиям можно судить о хрупком характере разрушения: покрытие отслаивается достаточно большими фрагментами с острыми краями.

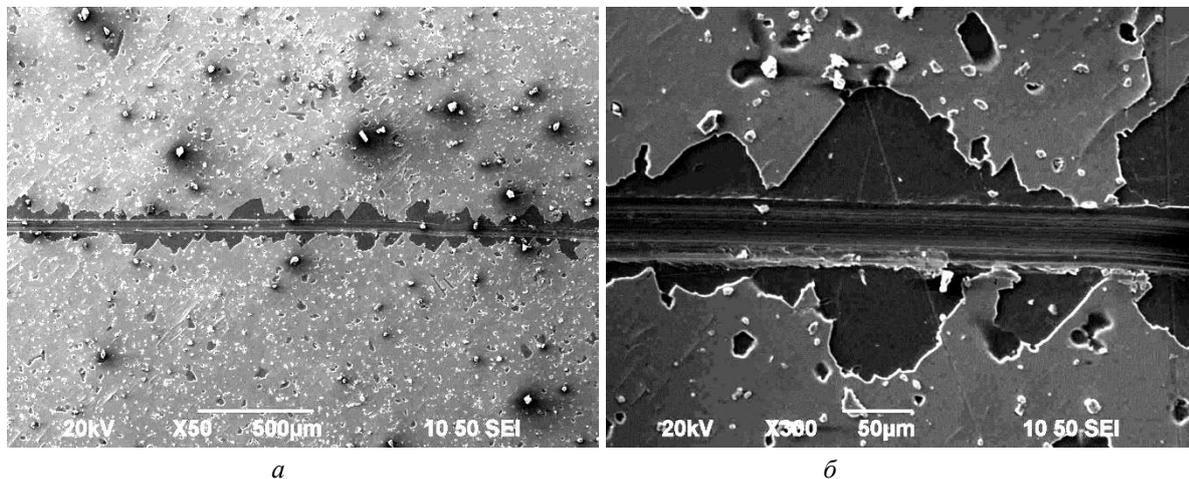


Рис. 1. Микрофотографии поверхности после проведения scratch-теста циркониевого покрытия, нанесенного по технологическим параметрам с приложенным усилием  $P=0.7$  Н.  
а) 100х-кратное увеличение, б) 300х-кратное увеличение

### III. РАСЧЕТ СИЛЫ АДГЕЗИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИНЦИПА СУПЕРПОЗИЦИИ БОЛЬШОГО ЧИСЛА ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

В процессе исследования причин адгезионного характера разрушения при склерометрии проводилось физико-математическое моделирование напряженного состояния покрытия при воздействии индентором сферической формы. Проводился расчет пространственного распределения компонентов тензора напряжений.

Во многих случаях напряженные состояния моделируются методом разбиения среды на конечные элементы и распределения напряжений определяются численным решением дифференциальных уравнений теории упругости. При таком моделировании зачастую прибегают к различным приближениям при линейаризации систем уравнений, и, как следствие, эти методы дают определенную погрешность и требуют существенных затрат машинного времени. В работе [15] подробно изложено решение уравнений методом конечных элементов и методом конечных разностей и проведен сравнительный анализ результатов.

Для более точного расчета компонентов тензора напряжений в настоящей работе были использованы зависимости, позволяющие рассчитать поверхностное распределение напряжений при силовом воздействии

на некоторую точку бесконечной пластины, которые были получены аналитически в работе [16]. Данный подход является альтернативным с математической точки зрения для расчета напряжений.

Поскольку сила является точечным источником механических напряжений и действует в срединной плоскости условно «бесконечной» пластинки, в этом случае поверхностное распределение напряжений можно получить путем наложения тензора деформаций и тензора напряжений, как показано в работе [17]. Распределения нормального радиального компонентов напряжения  $\sigma_r$ , и касательного напряжения  $\sigma_{r\theta}$  в зависимости от расстояния  $r$ , отсчитываемого от точки  $O$  вдоль поверхности покрытия, к которой приложена нагрузочная сила в срединной плоскости бесконечной пластинки. Также, в перпендикулярном направлении вдоль поверхности покрытия возникает компонента  $\sigma_\theta$ .

Несмотря на то, что вертикальные смещения в обоих случаях будут одинаковыми, эти пластины нельзя рассматривать по отдельности, потому что горизонтальные смещения вдоль границ будут различаться. Таким образом, в пластине возникают как напряжения растяжения, так и напряжения сжатия наподобие тех, которые появляются при изгибе кривого бруса. В настоящей работе этот факт учтен при интегрировании уравнений упругости. Зависимости, полученные для расчета компонентов тензора напряжения в цилиндрической системе координат, были заимствованы из работы [16].

Если некоторая сила  $\vec{P}$  является точечным источником механических напряжений и действует в срединной плоскости бесконечной пластинки, то распределение компонентов тензора напряжений можно получить формулам:

$$\sigma_r = -\frac{3+\nu}{4\pi} \frac{P \cos \theta}{r}; \quad \sigma_\theta = -\frac{1-\nu}{4\pi} \frac{P \cos \theta}{r}; \quad \sigma_{r\theta} = -\frac{1-\nu}{4\pi} \frac{P \sin \theta}{r}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\theta$  – азимутальный угол в цилиндрических координатах, который отсчитывается от направления движения индентора [16].

Также компоненты напряжения в декартовых координатах можно найти по следующим формулам [16] и, применив принцип суперпозиции по источникам, получаем следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sum_{i=1}^n \frac{P_i \cos \theta_i}{4\pi r_i} (-(3+\nu) + (1+\nu) \sin^2 \theta_i); \\ \sigma_y &= \sum_{i=1}^n \frac{P_i \cos \theta_i}{4\pi r_i} (1-\nu - 2(1+\nu) \sin^2 \theta_i); \\ \sigma_{xy} &= -\sum_{i=1}^n \frac{P_i \sin \theta_i}{4\pi r_i} (1-\nu - 2(1+\nu) \cos^2 \theta_i). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь координатные оси  $X$  и  $Y$  лежат в плоскости покрытия, причем ось  $X$  сонаправлена по движению индентора, а ось  $Y$  направлена в перпендикулярном направлении.

На графике рис. 2а видим: компонента  $\sigma_x$  принимает отрицательные значения, что в теории упругости означает – напряжения сжатия. Необходимо заметить, что цирконий и сталь – металлы, которые обладают высокой твердостью и хорошо работают на сжатие. Расчеты, что градиент распределения напряжений вблизи индентора направлен под углом к поверхности и тем самым оказывает скальвующие действие на покрытие из-за различных упругих свойств материалов: циркония, адгезионного слоя и материала подложки (стали).

На графике рис. 2б также видим, что наибольшая величина напряжения  $\sigma_y$  возникает вблизи границы между индентором и покрытием (наибольшее по модулю напряжение достигается на самой границе). На микрофотографии рис. 2 видно разрушение покрытия именно в этом месте. Очень важным результатом модельного расчета является то, что в покрытии появляются как положительные (растягивающие), так и отрицательные (сжимающие) напряжения  $\sigma_y$ . В результате возникновения градиента напряжений покрытие из более глубоких слоев выдавливается наружу. Следовательно, при склерометрии идет и отслоение покрытия и за пределами границы следа индентора. Также расчет касательных напряжений  $\sigma_{r\theta}$  показал, что превышение предела прочности возле границы углубленной части индентора вносит свой вклад в разрушение покрытия.

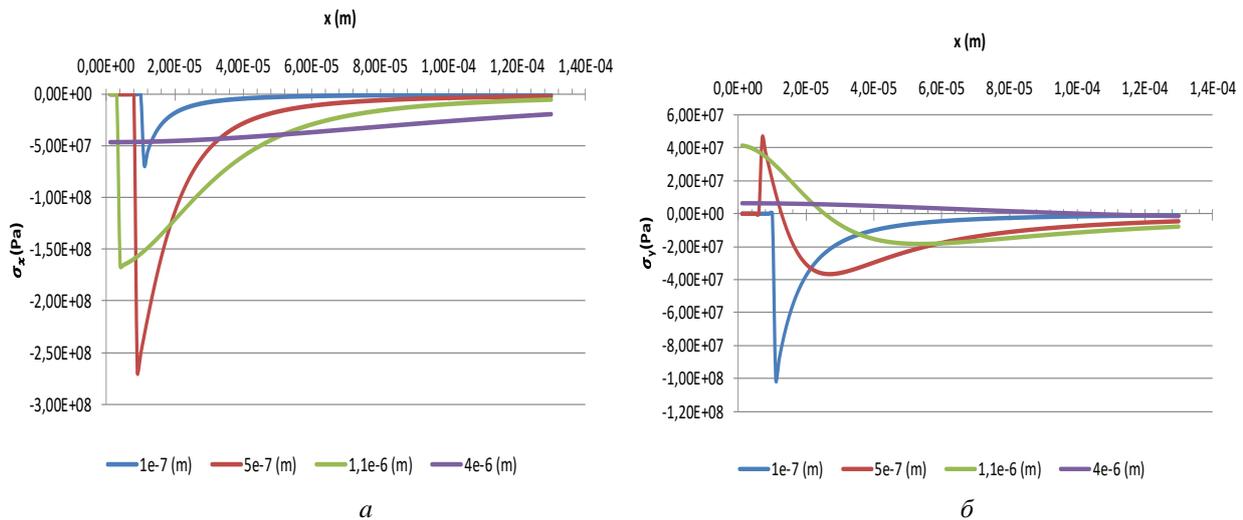


Рис. 2. Распределение внутренних напряжений в покрытии, возникающее по направлениям  $x$  и  $y$ , на глубинах: 0.1 мкм; 0.5 мкм; 1.1 мкм и 0.4 мкм при склерометрическом исследовании индентором диаметра 40 мкм и силовой нагрузке 0.7 Н.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подобраны близкие к оптимальным технологические параметры нанесения сплошного однородного циркониевого покрытия на стальную подложку магнетронным методом. Расстояние от испарителя ионов до стенки – 140 мм; давление в камере в режиме очистки –  $5 \cdot 10^{-5}$  мм. рт. ст. ( $6,65 \cdot 10^{-3}$  Па); ионная очистка – 100 В при силе тока – 0.3 А; нагрев подложки до  $50^\circ\text{C}$ ; время напыления – 30 минут без вращения.

2. В ходе исследовательской работы проводилось склерометрическое исследование нанесенных покрытий и произведен расчет прочности сцепления на основании экспериментальных данных. Сила адгезии такого покрытия лежит в пределах:  $140 \div 160$  МПа.

3. Применен алгоритм расчета внутренних напряжений при склерометрии по описанной модели: суперпозиции большого числа точных источников напряжений. Полученные результаты позволили объяснить адгезионное разрушение и отслоение покрытий под действием градиента по глубине образца возникающих растягивающих напряжений. Расчет показал, что предельное значение силы адгезии должно составлять:  $100 \div 120$  МПа, что несколько ниже величины предела прочности циркония, который на растяжение составляет 253 МПа.

4. В работе предложен альтернативный математический метод расчета внутренних напряжений в системе покрытия матриц, сочетающий аналитическое решение для точечного источника с численным расчетом суперпозиции точечных источников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khludnev A. M., Kovtunenkov V. A. Analysis of cracks in solids. Southampton // Eur. J. 2017. Vol. 2. P. 1–3.
2. Ницев К. Н., Мартыненко В. А., Беглов В. И. [и др.] Исследования свойств многослойной металлизации структур "кремний на молибдене", полученной методом магнетронного распыления // Известия высших учебных заведений. Поволжский район. 2013. № 3(27). С. 248–260.
- 3 Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнология. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. 410 с. ISBN 5-9221-0582-5.
- 3 Mitin, D. M., Serdobintsev A. A. Effect of Scattering of Sputtered Atoms on the Growth Rate of Films Fabricated by Magnetron Sputtering // Technical Physics Letters. 2017. Vol. 43, no. 9, P. 814–816.
4. Bull S. J., Berasetegui E. G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing // Tribol International. 2006. Vol. 39, no. 2. P. 99–114.

5. Othman M. F., Bushroa A. R., Abdullah W. N. R. Evaluation techniques and improvements of adhesion strength for TiN coating in tool applications: a review // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2015. Vol. 29, no. 7, P. 569–591. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.997379>.
6. Zhaoxiang Chen, Kun Zhou, Xuehong Lu, Yee Cheong Lam. A review on the mechanical methods for evaluating coating adhesion // *Acta Mechanica*. 2014. Vol. 225. P. 431–452.
7. Склерометрия : Теория, методика, применение испытаний на твердость царапанием : материалы совещания, 8-11 апр. 1966 г. / отв. ред. М. М. Хрущов ; АН СССР. Гос. науч.-исслед. ин-т машиноведения. М. : Наука, 1968. – 218 с.
8. Нищев К. Н., Мартынено В. А., Беглов В. И. [и др.] Исследования свойств многослойной металлизации структур "кремний на молибдене", полученной методом магнетронного распыления // *Известия высших учебных заведений. Поволжский район*. 2013. № 3(27). С. 248–260.
9. Alekseeva, O. K., Lutikova E. K., Markelov V. V. [et al.] Stationary and pulsed magnetron sputtering technologies for protective/catalyst layer production for PEM systems // *International Journal of Electrochemical Science*. 2018. Vol. 13. P. 797–811.
10. Vega-Moran R. C., Rodríguez Castro G.A., Melo-Máximo D. V. [et al.]. Adhesion and mechanical properties of Ti films deposited by DC magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 349. P. 1137–1147.
11. Мушегян В. О. Технология нанесения износостойких покрытий нитрида хрома на чеканочные инструменты с помощью магнетронного распыления // *Научные труды Донецкого национального технического университета*. 2010. № 12. С. 260–268.
12. Xie Y., Hawthorne H. M. Effect of contact geometry on the failure modes of thin coatings in the scratch adhesion test // *Surface and Coatings Technology*. 2002. Vol. 155, no 2-3, P. 121–129. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00064-6).
13. Xie Y., Hawthorne H. M. A model for compressive coating stresses in the scratch adhesion test // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 141, no. 1. P. 15–25.
14. Briscoe B. J., Delfino A., Pelillo E. Single-Pass Pendulum Scratching of Poly(styrene) and Poly(methylmethacrylate) // *Wear*. 1999. Vol. 225–229. P. 319–328. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00051-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00051-4).
15. Смолин И. Ю., Соппа Э., Шмаудер S., Макаров П. В. Двумерное моделирование пластической деформации в матрице металлокерамического композита на мезоуровне: оценка напряженных состояний и численных методов // *Физическая мезомеханика*. 2000. Т. 3, № 1. С. 17–22.
16. Тимошенко, С. П., Гудьер, Дж. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. М. : Наука, 1975. 576 с.
17. Mitin, D. M., Serdobintsev A. A. Effect of Scattering of Sputtered Atoms on the Growth Rate of Films Fabricated by Magnetron Sputtering // *Technical Physics Letters*. 2017. Vol. 43, no. 9. P. 814–816.

УДК 519.876.5

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-91-104

## РАЗРАБОТКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

### DEVELOPMENT OF AN OPTIMIZATION SIMULATION MODEL OF THE PRODUCTION PROCESS

И. В. Ревина, Е. Н. Трифонова

Омский Государственный Технический Университет, г. Омск, Россия

I. V. Revina, E. N. Trifonova

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Аннотация.** В статье рассматривается оптимизация производственного процесса на основе имитационного моделирования в программном продукте Arena Rockwell. Разработана имитационная модель текущего процесса "AS-IS". На основе параметров оптимизации – максимальная загрузка оборудования, минимальное количество единиц оборудования, разработана целевая модель процесса "TO-BE". В результате имитационного моделирования при рассмотрении процессов были установлены параметры: коэффициент использования станков, средняя продолжительность пребывания деталей в производственном процессе, среднее число деталей в очереди, среднее время пребывания деталей в очереди, прибыль и убытки при реализации производственного процесса. Полученные результаты моделирования позволили рекомендовать поточную линию на основе группового технологического процесса обработки деталей. Это позволит повысить экономическую эффективность производственного процесса в 1.36 раза при сокращении количества используемого оборудования на 16 единиц по сравнению с индивидуальными (единичными) технологическими процессами обработки деталей.

**Ключевые слова:** производственная система, имитационное моделирование, цифровые двойники, организация производства

**Abstract.** The article discusses the optimization of the production process based on simulation modeling in the Arena Rockwell software product. A simulation model of the current "AS-IS" process has been developed. Based on optimization parameters - maximum equipment load, minimum number of units, a target model of the "TO-BE" process was developed. As a result of simulation modeling, when considering processes, the following parameters were established: the utilization rate of machine tools, the average duration of stay of parts in the production process, the average number of parts in the queue, the average time of stay of parts in the queue, profit and loss during the implementation of the production process. The obtained modeling results made it possible to recommend a production line based on a group technological process for processing parts. This will increase the economic efficiency of the production process by 1.36 times while reducing the number of equipment used by 16 units compared to individual (single) technological processes for processing parts.

**Keywords:** production system, simulation modeling, digital twins, production organization.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Производственный процесс – это сложная система, состоящая из множества различных подсистем, элементов [1]. Моделирование – это один из методов изучения объектов, процессов, явлений. Моделирование производственной системы позволяет изучить функционирования этих систем, определить "узкие места", выявить проблемы [2].

Концепция цифровых двойников была предложена в 2002 году. В ее основе лежит идея использования информационной конструкции для описания и моделирования физических систем [3]. Цифровой двойник – это "виртуальная копия" или "имитационная модель" физического объекта [4]. Концепция цифрового двойника направлена на интеграцию математических моделей в реальную работу. Такая модель может быть реализована с помощью сложной математической модели или с помощью более простой в деталях, но более широкой по охвату модели интегрированного процесса, представляющего всю производственную систему [5]. Использование концепции цифровых двойников позволяет моделировать, анализировать, оптимизировать производственные системы и процессы.

Имитационное моделирование – это процесс моделирования поведения реальной системы, экспериментирования над моделью, с целью понять поведения этой системы в рамках некоторых ограничений [6]. Существует три основных метода имитационного моделирования – это дискретно-событийное моделирование, системная динамика, агентное моделирование. Метод дискретно-событийного моделирования основан на описании изменения состояния системы (состоящей из отдельных элементов), происходящих в дискретные моменты времени. Для дискретно-событийного моделирования используют методы: системы массового обслуживания, сети Петри.

Имитационное моделирование используется для оптимизации производственных процессов в различных отраслях [7, 8, 9]. В машиностроении целесообразно использовать дискретно-событийное моделирование для процессов изготовления, ремонта и сборки изделий [9 – 12]. Для процесса изготовления деталей, следует отдавать предпочтения моделированию серийного и массового типа производств, для которых характерен большой объем производства и непрерывность выполнения. Особенно имитационное моделирование актуально на стадии технологической подготовки производства, при реконструкции производства, при замене оборудования и др. Моделирование единичного, типового или группового технологического процесса позволит выбрать наиболее оптимальный вариант организации производственного процесса, исходя из конкретных параметров данного предприятия или организации.

Целью данной работы является обоснование эффективной формы организации производственного процесса для изготовления деталей пяти типов. Разработка имитационной модели текущего процесса и оптимизированной целевой модели позволит решить поставленную задачу.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Производственный процесс изготовления пяти деталей типа "Фланец" реализуется по индивидуальным (единичным) технологическим процессам. Подача деталей на обработку и передача по операциям осуществляется поштучно. Станки, используемые для обработки каждой детали и штучное время обработки на станках, представлено в табл. 1. При обработке деталей типа "Фланец" была выполнена синхронизация операций с целью выравнивания времени обработки на одинаковых станках. На каждой операции используется одна единица оборудования. Замена операций местами не допускается. Время подачи деталей на обработку определяется программой выпуска и составляет: "Detail 1" –  $6.5 \pm 2.5$  мин; "Detail 2" –  $9 \pm 3$  мин; "Detail 3" –  $14 \pm 1$  мин; "Detail 4" –  $9.5 \pm 1.5$  мин; "Detail 5" –  $13 \pm 3$  мин.

Для оценки экономических параметров процесса изготовления учитывалась прибыль за обработку деталей и убытки из-за простоя станков. Экономическая эффективность определялась по формуле:

$$C = C_w - C_p, \quad (1)$$

где  $C_w$  – суммарная прибыль за обработку деталей на всех станках – определяется часовой ставкой и временем работы для каждого станка,  $C_p$  – суммарные убытки из-за простоя станков – определяются часовой ставкой и временем простоя для каждого станка. Коэффициент использования станков будет определен на основе результатов имитационного моделирования. В табл. 2 представлены экономические параметры использования станков.

Представленные выше данные позволят разработать модель процесса "AS-IS". Для разработки имитационной модели "TO-BE", для группового технологического процесса изготовления деталей необходимо сгруппировать станки по типам. В табл. 3 представлена матрица использования станков, на основе которой необходимо разработать модель "TO-BE".

Для разработки оптимизационной имитационной модели производственного процесса необходимо реализовать следующие этапы.

1. Разработаем имитационную модель процесса "AS-IS" для обработки пяти деталей и проанализируем полученные результаты (коэффициент использования оборудования, среднее число деталей в очереди на обработку к конкретному станку, средняя продолжительность пребывания деталей в очереди на обработку, средняя продолжительность пребывания деталей в производственном процесс, экономические параметры производственного процесса; указанные параметры будем оценивать на всех последующих этапах).

2. Разработаем имитационную модель процесса "TO-BE" для обработки деталей по групповой технологии.

3. Выполним оптимизацию имитационной модели "TO-BE".

Имитационные модели должны рассматривать выполнение производственного процесса за 1 смену (8 часов).

Для разработки дискретно-событийных имитационных моделей целесообразно использовать специальное программное обеспечение. Оно предоставляет разработчику моделей среду, которая, по сравнению со скриптовыми языками, позволяет создавать модели за меньшее время и с меньшими трудозатратами. Наиболее распространенными программными продуктами для дискретно-событийного моделирования являются Arena (Rockwell Automation), Simul8 (Simul8 Corporation), AnyLogic (The AnyLogic Company) [13]. Сравнительный анализ процессов моделирования в программах с открытым исходным кодом и в коммерческом пакете моделирования Arena представлен в работе [14]. Arena Rockwell Soft отличается широкими функциональными возможностями, простотой использования, богатым набором статистических показателей, включает динамическую анимацию [15]. Поэтому в данной работе будет использоваться программный продукт Arena.

ТАБЛИЦА 1  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Номер детали	Номер операции	Используемый станок	Время обработки детали на станке символов	
			Минимальное, мин	Максимальное, мин
Detail 1	OP11	8B262	1.5	3
	OP12	6T12	1.5	2
	OP13	6T82G	1.5	2
	OP14	SL1	5	7
	OP15	3P722DB	3	4.5
	OP16	2254BMF4	4	5
	OP17	2N125	1	2
	OP18	SL	2	3
	OP19	KONTR	4	5
Detail 2	OP21	8B262	1.5	3
	OP22	6T82G	1.5	2
	OP23	3P722DB	3	4.5
	OP24	2N125	1	2
	OP25	SL	2	3

	OP26	KONTR	4	5
Detail 3	OP31	8B262	1.5	3
	OP32	6T12	1.5	2
	OP33	7512	6	8
	OP34	2N125	1	2
	OP35	SL	2	3
	OP36	3P722DB	4.5	5.5
	OP37	KONTR	4	5
Detail 4	OP41	6T12	1.5	2
	OP42	6T82G	4	6
	OP43	3710D	7	9
	OP44	6T82G	1.5	2
	OP45	SL1	5	7
	OP46	3P722DB	3	4.5
	OP47	2N125	1	2
	OP48	SL	2	3
	OP49	3P722DB	4.5	5.5
	OP410	SL2	6	7.5
	OP411	KONTR	4	5
Detail 5	OP51	3P722DB	5.5	7.5
	OP52	2N125	1	2
	OP53	2254BMF4	6	8
	OP54	6T12	5	7
	OP55	3P722DB	7	8.5
	OP56	SL	2	3
	OP57	KONTR	4	5

ТАБЛИЦА 2  
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАНКОВ

Модель станка	Прибыль за обработку деталей, 10 <sup>3</sup> р/час	Убытки из-за простоя, 10 <sup>3</sup> р/час
7512	0.9	0.25
3P722DB	1.2	0.35
6T82G	1.0	0.25
3710D	1.1	0.3
2254BMF4	1.6	0.7
6T12	1.0	0.2
8B262	0.5	0,15
2N125	0.5	0.2
SL	0.7	0.2
SL1	0.5	0.1
SL2	0.5	0.1
KONTR	0.7	0.1

ТАБЛИЦА 3  
МАТРИЦА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАНКОВ

Номер операции	Используемый станок	Номер детали				
		Detail 1	Detail 2	Detail 3	Detail 4	Detail 5
OP11 OP21 OP31	8B262	+	+	+		
OP12 OP32 OP41	6T12	+		+	+	
OP51	3P722DB					+
OP42	6T82G				+	
OP43	3710D				+	
OP13 OP22 OP44	6T82G	+	+		+	
OP14 OP45	SL1	+			+	
OP15 OP23 OP46	3P722DB	+	+		+	
OP16	2254BMF4	+		+		
OP33	7512					
OP17 OP24 OP34 OP47 OP52	2N125	+	+	+	+	+
OP53	2254BMF4					+
OP54	6T12					+
OP55	3P722DB					+
OP18 OP25 OP35 OP48 OP56	SL	+	+	+	+	+
OP36 OP49	3P722DB			+	+	
OP410	SL2				+	
OP19 OP26 OP37 OP411 OP57	KONTR	+	+	+	+	+

### III. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Имитационная модель "AS-IS" (1 этап моделирования) представлена на рис. 1. Модули "Create" (Create 1, Create 2, Create 3, Create 4, Create 5) используются для генерации поступления деталей ("Detail 1", "Detail 2", "Detail 3", "Detail 4", "Detail 5"). Модули OP11 – OP19 (модули "Process") моделируют производственный процесс обработки "Detail 1". Модули OP21 – OP26 (модули "Process") моделируют производственный процесс обработки "Detail 2". Модули OP31 – OP37 (модули "Process") моделируют производственный процесс обработки "Detail 3". Модули OP41 – OP411 (модули "Process") моделируют производственный процесс обра-

ботки "Detail 4". Модули OP51 – OP57 (модули "Process") моделируют производственный процесс обработки "Detail 5". Исходными данными для моделирования производственного процесса является информация из табл. 1 и табл. 2. На каждой операции используется одна единица оборудования.

На рис. 2 представлен фрагмент введенных параметров для имитационной модели "AS-IS".

Производственные процессы по обработке деталей ("Detail 1", "Detail 2", "Detail 3", "Detail 4", "Detail 5") запускаются одновременно, поскольку выполняются на разных производственных участках одного цеха. Модуль "Dispose" 1 (Dispose 1, Dispose 2, Dispose 3, Dispose 4, Dispose 5) выводит обработанные детали из производственного процесса.

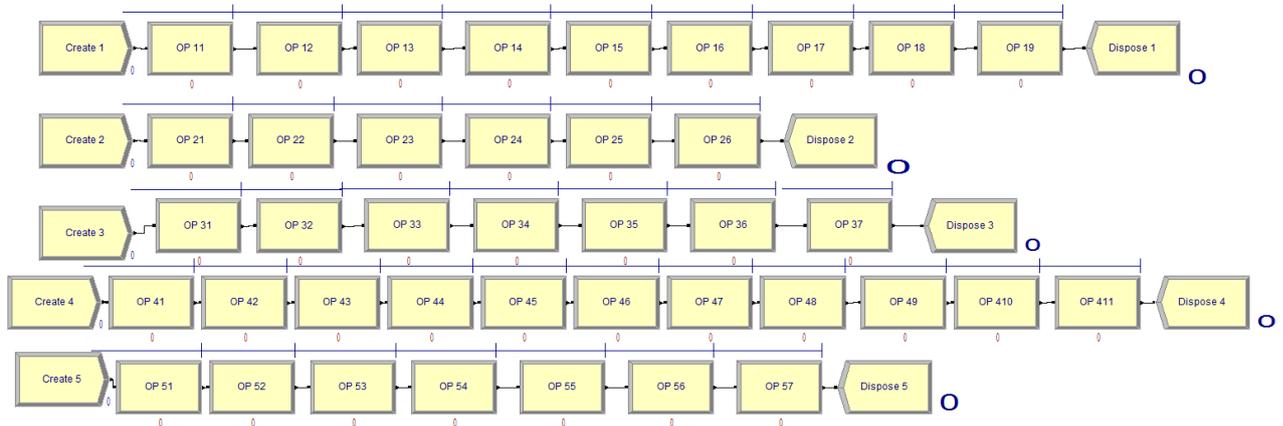


Рис. 1. Модель "AS-IS" (1 этап моделирования)

Process - Basic Process										
	Name	Type	Action	Priority	Resources	Delay Type	Units	Allocation	Minimum	Maximum
1	OP 11	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1.5	3
2	OP 12	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1.5	2
3	OP 13	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1.5	2
4	OP 14	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	5	7
5	OP 15	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	3	4.5
6	OP 16	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	4	5
7	OP 17	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1	2
8	OP 18	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	2	3
9	OP 19	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	4	5
10	OP 21	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1.5	3
11	OP 22	Standard	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1.5	2

Resource - Basic Process						
	Name	Type	Capa...	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use
1	Resour11 8B262	Fixed Capacity	1	0.5	0.15	0.0
2	Resour12 6T12	Fixed Capacity	1	1.0	0.2	0.0
3	Resour13 6T82G	Fixed Capacity	1	1.0	0.25	0.0
4	Resour14 SL1	Fixed Capacity	1	0.5	0.1	0.0
5	Resour15 3P722DB	Fixed Capacity	1	1.2	0.35	0.0
6	Resour16 2254BMF4	Fixed Capacity	1	1.6	0.7	0.0
7	Resour17 2N125	Fixed Capacity	1	0.5	0.2	0.0
8	Resour18 SL	Fixed Capacity	1	0.7	0.2	0.0
9	Resour19 KONTR	Fixed Capacity	1	0.7	0.1	0.0
10	Resour21 8B262	Fixed Capacity	1	0.5	0.15	0.0
11	Resour22 6T82G	Fixed Capacity	1	1.0	0.25	0.0
12	Resour23 3P722DB	Fixed Capacity	1	1.2	0.35	0.0
13	Resour24 2N125	Fixed Capacity	1	0.5	0.2	0.0
14	Resour25 SL	Fixed Capacity	1	0.7	0.2	0.0
15	Resour26 KONTR	Fixed Capacity	1	0.7	0.1	0.0

Рис. 2. Параметры для имитационной модели "AS-IS"

На рис. 3 представлена модель "TO-BE". Модель реализует групповой технологический процесс обработки деталей. Применяемые для обработки станки группируются по технологическому процессу в единую линию на основе матрицы использования станков (табл. 3). Все остальные исходные данные были взяты из табл. 1 и табл. 2.

Модули "Create" используются для генерации поступления деталей в модель. Модули "Process" имитируют процесс обработки деталей на соответствующих станках. Например, модуль "OP11 OP21 OP31 8B262" имитирует выполнение операции OP11 для "Detail 1", OP21 для "Detail 2" и OP31 для "Detail 3"; эти операции выполняются на станке модели 8B262. На каждой операции используется одна единица оборудования.

Модули "Decide" используются для разделения потока деталей ("Detail 1", "Detail 2", "Detail 3", "Detail 4", "Detail 5") по определенным типам, что позволяет реализовать необходимую последовательность операций обработки для каждой детали. В модели используется восемь модулей "Decide". Модуль "Dispose" 1 (Dispose 1, Dispose 2, Dispose 3, Dispose 4, Dispose 5) выводит обработанные детали из производственного процесса.

На рис. 4 представлен фрагмент введенных параметров для имитационной модели "TO-BE".

На 3 этапе моделирования необходимо выполнить оптимизацию по количеству используемых единиц оборудования на каждой операции. Кроме этого, необходимо сравнить экономические параметры имитационной модели "AS-IS" и оптимизированной модели "TO-BE".

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В основе концептуального подхода дискретно-событийного моделирования лежит концепция дискретных потоков. Основными элементами системы являются заявки, ресурсы, очередь и переход по событиям [16]. Для программного продукта Arena Rockwell Soft результаты отчета представлены на панели "Entity" "Resource", "Queue".

Для модели "AS-IS" (1 этап моделирования, рис. 1) результаты моделирования представлены на рис. 5, 6, 7. Из отчета, представленного на рис. 5, видно, что за 8 часов в производственный процесс поступило: "Detail 1" – 77, "Detail 2" – 52, "Detail 3" – 35, "Detail 4" – 52, "Detail 5" – 56, а было полностью обработано: "Detail 1" – 71, "Detail 2" – 51, "Detail 3" – 33, "Detail 4" – 46, "Detail 5" – 52. Средняя полная продолжительность пребывания деталей в производственном процессе обработки составила: "Detail 1" – 30.0769 минут, "Detail 2" – 16.1632 минут, "Detail 3" – 24.2916 минут, "Detail 4" – 46.4846 минут, "Detail 5" – 37.2683 минут. Одновременно в процессе обработки находилось в среднем: "Detail 1" – 4.6451 штук, "Detail 2" – 1.7381 штук, "Detail 3" – 1.7162 штук, "Detail 4" – 4.7679 штук, "Detail 5" – 4.2107 штук.

Из рис. 6 видно, что коэффициент использования оборудования для обработки деталей неравномерный, небольшой. Для "Detail 1" минимальная величина – 0.23 ((OP17) Resource 17 2N125), а максимальная величина – 0.94 ((OP14) Resource 14 SL1). Для "Detail 2" – 0.17 ((OP24) Resource 24 2N125)...0.48 ((OP26) Resource 26 KONTR). Для "Detail 3" – 0.10 ((OP34) Resource 34 2N125)...0.49 ((OP33) Resource 33 7512). Для "Detail 4" – 0.15 ((OP47) Resource 47 2N125)...0.48 ((OP43) Resource 43 3710D). Для "Detail 5" – 0.17 ((OP52) Resource 52 2N125)...0.87 ((OP55) Resource 55 3P722DB). На всех операциях использовалась одна единица оборудования.

Из рис. 7 видно, что очереди практически нет, за исключением: OP14 – 1.4222 минут (0.2222 деталей), OP51 – 0.2971 минут (0,0346 деталей), OP55 – 1.1334 минут (0.1275 деталей).

Для модели "AS-IS" (рис. 6) суммарная прибыль за обработку всех деталей на всех станках составила  $121.87 \cdot 10^3$ р ("Busy Cost"), а убытки из-за простоя станков  $41.13 \cdot 10^3$ р ("Idle Cost"). Таким образом, прибыль по всем производственным процессам по обработке деталей пяти типов (согласно формуле 1) составила  $80.74 \cdot 10^3$ р. При этом было задействовано 40 единиц оборудования.

При выполнении 2 этапа моделирования имитационной модели "TO-BE" (рис. 3) были выявлены "узкие места". Среднее время ожидания в очереди: для OP14 OP45 SL1 – 128.25 минут, для OP19 OP26 OP37 OP411 OP57 KONTR – 66.8034 минут, OP18 OP25 OP35 OP48 OP56 SL – 4.9474 минут. Среднее количество деталей в очереди составляет: для OP14 OP45 SL1 – 48.2975, для OP19 OP26 OP37 OP411 OP57 KONTR – 50.3853, OP18 OP25 OP35 OP48 OP56 SL – 3.8639. Наличие очереди на указанных операциях значительно замедляет выполнение производственного процесса. Поэтому необходимо выполнить оптимизацию по количеству используемого оборудования.

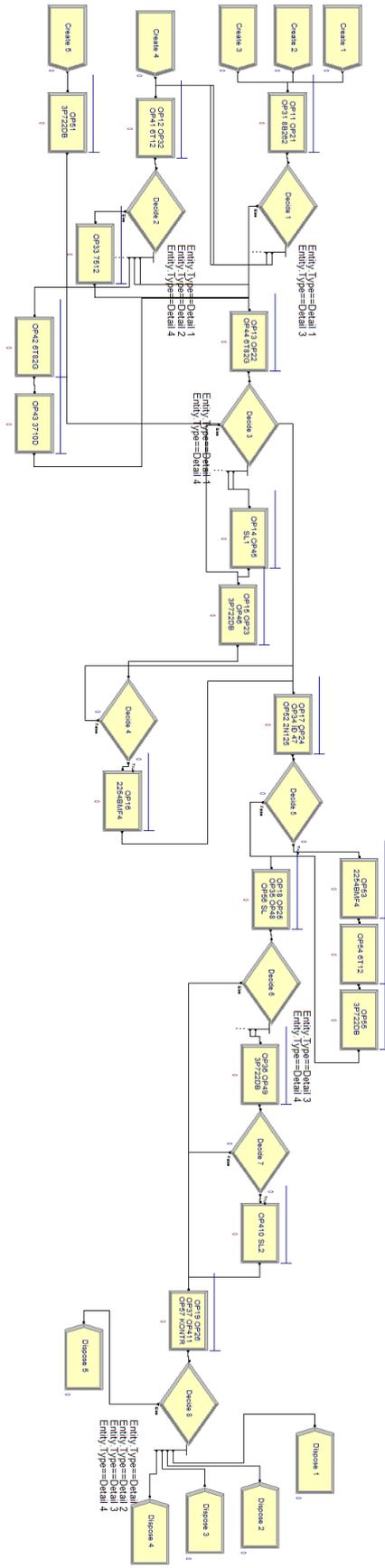


Рис. 3. Модель "ТО-ВЕ" (2 этап моделирования)

Process - Basic Process												
Name	Type	Action	Priority	Resources	Delay Type	Units	Allocation	Minimum	Maximum	Report		
1	OP11 OP21 OP31 8B262	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1.5	3	<input checked="" type="checkbox"/>		
2	OP51 3P722DB	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	5.5	7.5	<input checked="" type="checkbox"/>		
3	OP12 OP32 OP41 6T12	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1.5	2	<input checked="" type="checkbox"/>		
4	OP33 7512	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	6	8	<input checked="" type="checkbox"/>		
5	OP42 6T82G	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	4	6	<input checked="" type="checkbox"/>		
6	OP43 3710D	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	7	9	<input checked="" type="checkbox"/>		
7	OP13 OP22 OP44 6T82G	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1.5	2	<input checked="" type="checkbox"/>		
8	OP14 OP45 SL1	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	5	7	<input checked="" type="checkbox"/>		
9	OP15 OP23 OP46 3P722DB	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	3	4.5	<input checked="" type="checkbox"/>		
10	OP16 2254BMF4	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	4	5	<input checked="" type="checkbox"/>		
11	OP17 OP24 OP34 OP 47 OP52 2N125	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	1	2	<input checked="" type="checkbox"/>		
12	OP53 2254BMF4	Seize Delay Release	Medium(2)	1 rows	Uniform	Minutes	Value Added	6	8	<input checked="" type="checkbox"/>		
13	OP54 6T12	Seize Delay Release	Medium(2)	4 rows	Uniform	Minutes	Value Added	5	7	<input checked="" type="checkbox"/>		
Resource - Basic Process												
Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	States...	Failures	Report				
1	Res33 7512	Fixed Capacity	1	0.9	0.25	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
2	Res51 3P722DB	Fixed Capacity	1	1.2	0.35	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
3	Res42 6T82G	Fixed Capacity	1	1.0	0.25	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
4	Res43 3710D	Fixed Capacity	1	1.1	0.3	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
5	Res13 22 44 6T82G	Fixed Capacity	1	1.0	0.25	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
6	Res14 45 SL1	Fixed Capacity	1	0.5	0.1	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
7	Res15 23 46 3P722DB	Fixed Capacity	1	1.2	0.35	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
8	Res16 2254BMF4	Fixed Capacity	1	1.6	0.7	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
9	Res53 2254BMF4	Fixed Capacity	1	1.6	0.7	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
10	Res54 6T12	Fixed Capacity	1	1.0	0.2	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
11	Res55 3P722DB	Fixed Capacity	1	1.2	0.35	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
12	Res19 26 37 411 57 KONTR	Fixed Capacity	1	0.7	0.1	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
13	Res 11 21 31 8B262	Fixed Capacity	1	0.5	0.15	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
14	Res12 32 41 6T12	Fixed Capacity	1	1.0	0.2	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
15	Res17 24 34 47 52 2N125	Fixed Capacity	1	0.5	0.2	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
16	Res18 25 35 48 56 SL	Fixed Capacity	1	0.7	0.2	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				
17	Res36 49 3P722DB	Fixed Capacity	1	1.2	0.35	0.0	0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>				

Рис. 4. Параметры для имитационной модели "TO-BE"

Entity			
Time		Other	
Total Time	Average	WIP	Average
Detail 1	30.0769	Detail 1	4.6451
Detail 2	16.1632	Detail 2	1.7381
Detail 3	24.2916	Detail 3	1.7162
Detail 4	46.4846	Detail 4	4.7679
Detail 5	37.2683	Detail 5	4.2107

Other			
Number In	Value	Number Out	Value
Detail 1	77.0000	Detail 1	71.0000
Detail 2	52.0000	Detail 2	51.0000
Detail 3	35.0000	Detail 3	33.0000
Detail 4	52.0000	Detail 4	46.0000
Detail 5	56.0000	Detail 5	52.0000

Рис. 5. Отчет по модели "AS-IS", параметр "Entity"

Resource					
Usage					
	Inst Util	Num Sched		Inst Util	Num Sched
Resour11 8B262	0,36	1,00	Resour41 6T12	0,19	1,00
Resour12 6T12	0,27	1,00	Resour410 SL2	0,68	1,00
Resour13 6T82G	0,27	1,00	Resour411 KONTR	0,43	1,00
Resour14 SL1	0,94	1,00	Resour42 6T82G	0,53	1,00
Resour15 3P722DB	0,59	1,00	Resour43 3710D	0,84	1,00
Resour16 2254BMF4	0,69	1,00	Resour44 6T82G	0,18	1,00
Resour17 2N125	0,23	1,00	Resour45 SL1	0,63	1,00
Resour18 SL	0,38	1,00	Resour46 3P722DB	0,37	1,00
Resour19 KONTR	0,68	1,00	Resour47 2N125	0,15	1,00
Resour21 8B262	0,24	1,00	Resour48 SL	0,25	1,00
Resour22 6T82G	0,19	1,00	Resour49 3P722DB	0,50	1,00
Resour23 3P722DB	0,40	1,00	Resour51 3P722DB	0,77	1,00
Resour24 2N125	0,17	1,00	Resour52 2N125	0,17	1,00
Resour25 SL	0,27	1,00	Resour53 2254	0,79	1,00
Resour26 KONTR	0,48	1,00	Resour54 6T12	0,68	1,00
Resour31 8B262	0,16	1,00	Resour55 3P722DB	0,87	1,00
Resour32 6T12	0,13	1,00	Resour56 SL	0,26	1,00
Resour33 7512	0,49	1,00	Resour57 KONTR	0,49	1,00
Resour34 2N125	0,10	1,00			
Resour35 SL	0,17	1,00			
Resour36 3P722DB	0,35	1,00			
Resour37 KONTR	0,31	1,00			

Cost					
	Busy Cost	Idle Cost		Busy Cost	Idle Cost
Resour11 8B262	1.44	0.76	Resour41 6T12	1.54	1.29
Resour12 6T12	2.19	1.16	Resour410 SL2	2.67	0.26
Resour13 6T82G	2.16	1.45	Resour411 KONTR	2.37	0.45
Resour14 SL1	3.76	0.05	Resour42 6T82G	4.24	0.94
Resour15 3P722DB	5.60	1.16	Resour43 3710D	7.31	0.39
Resour16 2254BMF4	8.69	1.76	Resour44 6T82G	1.44	1.64
Resour17 2N125	0.91	1.24	Resour45 SL1	2.46	0.30
Resour18 SL	2.15	0.99	Resour46 3P722DB	3.60	1.75
Resour19 KONTR	3.76	0.26	Resour47 2N125	0.61	1.36
Resour21 8B262	0.95	0.92	Resour48 SL	1.41	1.20
Resour22 6T82G	1.53	1.62	Resour49 3P722DB	4.80	1.39
Resour23 3P722DB	3.80	1.69	Resour51 3P722DB	7.41	0.64
Resour24 2N125	0.66	1.34	Resour52 2N125	0.67	1.33
Resour25 SL	1.52	1.16	Resour53 2254BMF4	10.05	1.19
Resour26 KONTR	2.66	0.42	Resour54 6T12	5.42	0.51
Resour31 8B262	0.65	1.00	Resour55 3P722DB	8.30	0.38
Resour32 6T12	0.98	1.40	Resour56 SL	1.46	1.18
Resour33 7512	3.53	1.02	Resour57 KONTR	2.73	0.41
Resour34 2N125	0.42	1.43			
Resour35 SL	0.96	1.33			
Resour36 3P722DB	3.33	1.81			
Resour37 KONTR	1.73	0.55			

Рис. 6. Отчет по модели "AS-IS", параметр "Resource"

Queue				Queue			
Time		Waiting Time		Other		Number Waiting	
Waiting Time	Average	Waiting Time	Average	Number Waiting	Average	Number Waiting	Average
OP 11.Queue	0.00	OP 41.Queue	0.00	OP 11.Queue	0.00	OP 41.Queue	0.00
OP 12.Queue	0.00	OP 410.Queue	0.02050900	OP 12.Queue	0.00	OP 410.Queue	0.00205090
OP 13.Queue	0.00	OP 411.Queue	0.00	OP 13.Queue	0.00	OP 411.Queue	0.00
OP 14.Queue	1.4222	OP 42.Queue	0.00	OP 14.Queue	0.2222	OP 42.Queue	0.00
OP 15.Queue	0.00	OP 43.Queue	0.06713768	OP 15.Queue	0.00	OP 43.Queue	0.00713338
OP 16.Queue	0.01254224	OP 44.Queue	0.00	OP 16.Queue	0.00193360	OP 44.Queue	0.00
OP 17.Queue	0.00	OP 45.Queue	0.00	OP 17.Queue	0.00	OP 45.Queue	0.00
OP 18.Queue	0.00	OP 46.Queue	0.00	OP 18.Queue	0.00	OP 46.Queue	0.00
OP 19.Queue	0.02296883	OP 47.Queue	0.00	OP 19.Queue	0.00619395	OP 47.Queue	0.00
OP 21.Queue	0.00	OP 48.Queue	0.00	OP 21.Queue	0.00	OP 48.Queue	0.00
OP 22.Queue	0.00	OP 49.Queue	0.00	OP 22.Queue	0.00	OP 49.Queue	0.00
OP 23.Queue	0.00	OP 51.Queue	0.2971	OP 23.Queue	0.00	OP 51.Queue	0.03466027
OP 24.Queue	0.00	OP 52.Queue	0.00	OP 24.Queue	0.00	OP 52.Queue	0.00
OP 25.Queue	0.00	OP 53.Queue	0.1755	OP 25.Queue	0.00	OP 53.Queue	0.02048049
OP 26.Queue	0.00	OP 54.Queue	0.03008245	OP 26.Queue	0.00	OP 54.Queue	0.00344695
OP 31.Queue	0.00	OP 55.Queue	1.1334	OP 31.Queue	0.00	OP 55.Queue	0.1275
OP 32.Queue	0.00	OP 56.Queue	0.00	OP 32.Queue	0.00	OP 56.Queue	0.00
OP 33.Queue	0.00	OP 57.Queue	0.00	OP 33.Queue	0.00	OP 57.Queue	0.00
OP 34.Queue	0.00			OP 34.Queue	0.00		
OP 35.Queue	0.00			OP 35.Queue	0.00		
OP 36.Queue	0.00			OP 36.Queue	0.00		
OP 37.Queue	0.00			OP 37.Queue	0.00		

Рис. 7. Отчет по модели "AS-IS", параметр "Queue"

Entity			
Time		Other	
Total Time	Average	WIP	Average
Detail 1	32.3842	Detail 1	4.8034
Detail 2	25.5224	Detail 2	2.7019
Detail 3	35.6215	Detail 3	2.4720
Detail 4	52.0671	Detail 4	5.2257
Detail 5	39.3723	Detail 5	4.2098

Other			
Number In	Value	Number Out	Value
Detail 1	74.0000	Detail 1	69.0000
Detail 2	52.0000	Detail 2	49.0000
Detail 3	35.0000	Detail 3	32.0000
Detail 4	51.0000	Detail 4	45.0000
Detail 5	53.0000	Detail 5	49.0000

Рис. 8. Отчет по оптимизированной модели "TO-BE", параметр "Entity"

Результаты 3 этапа моделирования (оптимизированная модель "TO-BE") представлены на рис. 8, 9, 10. Из отчета, представленного на рис. 8, видно, что за 8 часов в производственный процесс поступило: "Detail 1" – 74, "Detail 2" – 52, "Detail 3" – 35, "Detail 4" – 51, "Detail 5" – 53, а было полностью обработано: "Detail 1" – 69, "Detail 2" – 49, "Detail 3" – 32, "Detail 4" – 45, "Detail 5" – 49. Средняя полная продолжительность пребывания

деталей в производственном процессе обработки составила: "Detail 1" – 32.3842 минут, "Detail 2" – 25.5224 минут, "Detail 3" – 35.6215 минут, "Detail 4" – 52.0671 минут, "Detail 5" – 39.3723 минут. Одновременно, в среднем, в процессе обработки находилось: "Detail 1" – 4.8034 штук, "Detail 2" – 2.7019 штук, "Detail 3" – 2.4720 штук, "Detail 4" – 5.2257 штук, "Detail 5" – 4.2098 штук.

На рис. 9 представлены использование ресурсов и экономические показатели использования. В оптимизированном производственном процессе "TO-BE" задействовано 24 единицы оборудования, и он выполняется на 18 операциях. Коэффициент использования оборудования более равномерный, он находится в диапазоне от 0.83 до 0.49.

На рис. 10 представлен отчет по параметру "Queue" для оптимизированной модели "TO-BE". Практически для всех операций среднее время ожидания в очереди меньше 1 минуты, за исключением OP36 OP49 3P722DB – 1.2349 минут и OP55 3P722DB – 1.2447 минут. При этом среднее количество деталей в очереди меньше единицы. Таким образом, оптимизированная модель "TO-BE" является эффективной.

Для оптимизированной модели "TO-BE" (рис. 9) суммарная прибыль за обработку всех деталей на всех станках составила  $123.33 \cdot 10^3$  р ("Busy Cost"), а убытки из-за простоя станков  $13.71 \cdot 10^3$  р ("Idle Cost"). Таким образом, прибыль по всем производственным процессам, по обработке деталей пяти типов (согласно формуле 1) составила  $109.62 \cdot 10^3$  р, что на  $28.88 \cdot 10^3$  р больше (или на 1.36 раза) чем для процесса "AS-IS" (за 8 часов реализации производственного процесса). При этом было задействовано 24 единицы оборудования, что на 16 единиц оборудования меньше, чем для процесса "AS-IS".

Resource Usage			Resource Cost		
	Inst Util	Num Sched		Busy Cost	Idle Cost
Res 11 21 31 8B262	0,73	1,00	Res 11 21 31 8B262	2.92	0.32
Res12 32 41 6T12	0,58	1,00	Res12 32 41 6T12	4.65	0.67
Res13 22 44 6T82G	0,75	1,00	Res13 22 44 6T82G	6.01	0.50
Res15 23 46 3P722DB	0,79	2,00	Res15 23 46 3P722DB	15.11	1.17
Res16 2254BMF4	0,66	1,00	Res16 2254BMF4	8.42	1.92
Res17 24 34 47 52 2N125	0,79	1,00	Res17 24 34 47 52 2N125	3.15	0.34
Res18 25 35 48 56 SL	0,66	2,00	Res18 25 35 48 56 SL	7.31	1.10
Res19 26 37 411 57 KONTR	0,77	3,00	Res19 26 37 411 57 KONTR	12.75	0.56
Res33 7512	0,49	1,00	Res33 7512	3.51	1.02
Res36 49 3P722DB	0,83	1,00	Res36 49 3P722DB	7.90	0.47
Res410 SL2	0,65	1,00	Res410 SL2	2.57	0.28
Res42 6T82G	0,51	1,00	Res42 6T82G	4.09	0.97
Res43 3710D	0,84	1,00	Res43 3710D	7.31	0.37
Res51 3P722DB	0,71	1,00	Res51 3P722DB	6.82	0.81
Res53 2254BMF4	0,75	1,00	Res53 2254BMF4	9.57	1.41
Res54 6T12	0,64	1,00	Res54 6T12	5.05	0.58
Res55 3P722DB	0,81	1,00	Res55 3P722DB	7.69	0.53
Res14 45 SL1	0,71	3,00	Res14 45 SL1	8.50	0.69

Рис. 9. Отчет по оптимизированной модели "TO-BE", параметр "Resource"

Использование имитационного моделирования для оптимизации производственных процессов изготовления деталей является эффективным инструментом, позволяющим рассмотреть различные формы организации производственного процесса, определить "узкие места", определить оптимальный вариант организации производственного процесса [11]. Использование анализа "Что если" в программном продукте Arena позволяет проверить представленные результаты. При этом результаты показывают, что процент ошибок модели Arena составляет менее 5% [17].

Результатом моделирования в данной работе является оптимизация производственного процесса изготовления деталей. Была разработана имитационная модель "AS-IS" для обработки деталей пяти видов по индивидуальным (единичным) технологическим процессам. Имитационная модель "TO-BE" реализует групповой технологический процесс для деталей пяти видов.

Queue		Queue	
Time		Other	
Waiting Time	Average	Number Waiting	Average
OP11 OP21 OP31 8B262.Queue	0.8499	OP11 OP21 OP31 8B262.Queue	0.2848
OP12 OP32 OP41 6T12.Queue	0.3237	OP12 OP32 OP41 6T12.Queue	0.1066
OP13 OP22 OP44 6T82G.Queue	0.6834	OP13 OP22 OP44 6T82G.Queue	0.2961
OP14 45 SL1.Queue	0.04405324	OP14 45 SL1.Queue	0.01587752
OP15 OP23 OP46 3P722DB.Queue	0.4853	OP15 OP23 OP46 3P722DB.Queue	0.2073
OP16 2254BMF4.Queue	0.4445	OP16 2254BMF4.Queue	0.06575170
OP17 OP24 OP34 OP 47 OP52 2N125.Queue	0.9246	OP17 OP24 OP34 OP 47 OP52 2N125.Queue	0.4944
OP18 OP25 OP35 OP48 OP56 SL.Queue	0.1682	OP18 OP25 OP35 OP48 OP56 SL.Queue	0.08830851
OP19 OP26 OP37 OP411 OP57 KONTR.Queue	0.5532	OP19 OP26 OP37 OP411 OP57 KONTR.Queue	0.2866
OP33 7512.Queue	0.00	OP33 7512.Queue	0.00
OP36 OP49 3P722DB.Queue	1.2349	OP36 OP49 3P722DB.Queue	0.2058
OP410 SL2.Queue	0.3117	OP410 SL2.Queue	0.03051622
OP42 6T82G.Queue	0.00	OP42 6T82G.Queue	0.00
OP43 3710D.Queue	0.2714	OP43 3710D.Queue	0.02827415
OP51 3P722DB.Queue	0.3289	OP51 3P722DB.Queue	0.03631120
OP53 2254BMF4.Queue	0.5591	OP53 2254BMF4.Queue	0.06056801
OP54 6T12.Queue	0.00594839	OP54 6T12.Queue	0.00064441
OP55 3P722DB.Queue	1.2447	OP55 3P722DB.Queue	0.1323

Рис. 10. Отчет по оптимизированной модели "ТО-ВЕ", параметр "Queue"

## V. ВЫВОДЫ

Оптимизированная модель "ТО-ВЕ" позволила найти оптимальные параметры организации группового технологического процесса для изготовления деталей. В результате моделирования оказалось возможным повысить экономическую эффективность производственного процесса в 1.36 раза при сокращении количества используемого оборудования на 16 единиц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов К. Б. Методология реформирования системы управления организации : моногр. Самара : Изд-во "СамНЦ РАН", 2014. 296 с. ISBN 978-5-93424-698-4.
2. Law A. M., Kelton W. D. Simulation modeling and analysis. 3rd ed. Osborne : The McGraw-Hill Companies, 2000. 760 p.
3. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication // White Paper. 2014. Vol. 1. P. 1–7.
4. Bruckner L., Oppelt M., Urbas L., Barth M. The Current and Future Use of Simulation in Discrete and Process Industries. Siemens AG, 2020. 39 p. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:11e2a19a-144c-4d57-9e2a-6fa13101d48a/simulation-survey-report-2020-final.pdf> (date accessed: 19.10.2023).
5. Verboven P., Defraeye T., Datta, A. K., Nicolai B. Digital twins of food process operations: the next step for food process models? // Current Opinion in Food Science. 2020. Vol. 35, P. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002>.
6. Shannon R., Johannes J. D., Systems Simulation: the Art and Science, Mir, Moscow, 1978. 440p.

7. Yuan Z., Qiao Y., Guo Y. [et al.] Research on lean planning and optimization for precast component production based on discrete event simulation // *Advances in Civil Engineering*. 2020. P. 1-14. <https://doi.org/10.1155/2020/8814914>.
8. Hashim, S. A. M. H, Razak N. A., Adnan A. [et al.] A Discrete Event Simulation Case Study of Energy Consumption and Time Required for Medium Voltage Power Cable Manufacturing // *Borneo Engineering & Advanced Multidisciplinary International Journal (BEAM)*. 2023. Vol. 2. № 2. P. 19-30.
9. Grigoriev S. N., Dolgov V. A., Nikishechkin P. A. [et al.] Simulation modeling production processes of various types of machine-building enterprises // *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 142, no. 3. P. 84–99. DOI: 10.18698/0236-3941-2022-3-84-99.
10. Revina, I. V., Trifonova E. N., Simulation modeling of the assembly process. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441: Applied Mechanics and Systems Dynamics (AMSD). P. 012110-1–012110-10.
11. Revina I. V., Boyrkin G. N. Optimization of production process of manufacturing parts using simulation modeling of aperture // *Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2018) : proceedings international conference*. 2018. Vol. 157. P. 529–534. DOI 10.2991/aime-18.2018.101.
12. Брылова Т. Б., Кутышкин А. В. Использование имитационного моделирования при реинжиниринге технологических процессов ремонта подвижного состава // *Известия Транссиба*. 2020. №. 3 (43). С. 139–148.
13. Vázquez-Serrano J. I, Peimbert-García R. E., Cárdenas-Barrón L. E. Discrete-Event Simulation Modeling in Healthcare: A Comprehensive Review // *International journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, no. 22. P. 12262-1–12262-20. <https://doi.org/10.3390/ijerph182212262>.
14. Lang S., Reggelin T., Müller M., Nahhas A. Open-source discrete-event simulation software for applications in production and logistics: An alternative to commercial tools? // *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 180. P. 978–987. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.349>.
15. Kelton W. D., Sadowsky R. P., Sturrock D. T. *Simulation with Arena*. 3rd ed. New York : The McGraw-Hill Companies, 2010. 658 p.
16. *Discrete-event modeling and simulation (Theory and Applications)* / edited by G. A. Wainera, P. J. Mosterman. Boca Raton : CRC Press, 2018. 534 p. ISBN 9781315218731. <https://doi.org/10.1201/9781315218731>.
- 17 Rao A. R., Ahmad A. N. A., Ahmad M. F. Production Planning Towards Improving the Productivity Performance in Manufacturing Organization Using Arena Simulation // *Research in Management of Technology and Business*. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 878–884.