



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2022 Т. 30. № 4

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2022. Том 30. № 4

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь О.С. Афанасьева (к.т.н.)

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)

Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

Ю.Б. Казаков (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

А.В. Стариков (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

V. Naske (проф., Германия)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2022. Том 30. № 4)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
443100, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка О.С. Афанасьева

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.
Федеральная служба по надзору
в сфере связи информационных
технологий и массовых коммуникаций

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244
Главный корпус

Телефон: (846) 337 04 43
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Подписано в печать
Выход в свет 27.01.2023

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 27,93 п.л.
Уч.-изд. л. 27,28 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 178/22
Заказ № 7

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 2.3 – Информационные технологии и коммуникации; 2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.4 – Энергетика и электротехника. Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>) и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2022
© Самарский государственный
технический университет, 2022

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2022. Vol. 30. Issue 4

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Execute Secretary O.S. Afanaseva (PhD Techn.)

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S.Y. Borovik (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci.)

Yu.B. Kazakov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

A.V. Starikov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Yu.V. Zubkov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by O. S. Afanaseva

The Editorial Board Address:

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>) and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Rospechat catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

<i>Афиногентов А.А., Тычинина Ю.А.</i> Аналитическое решение краевой задачи математического моделирования нестационарного течения нефти по магистральному трубопроводу при наличии внутренних источников давления	6
<i>Лихтциндер Б.Я., Ольберг П.А.</i> Моделирование и цифровые двойники.....	20
<i>Лысенко Д.С.</i> Адаптивная система управления температурой сетевой воды на выходе котла-утилизатора	33
<i>Орлов С.П., Сусарев С.В.</i> имитационные модели на сетях Петри для анализа процессов обслуживания и ремонта сложных технических систем	49

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

<i>Альдебенев Н.С., Тонеев И.Р., Журавлева Е.С., Деморецкий Д.А.</i> Разработка активных теплозащитных материалов для информационно-измерительных приборов и систем, испытывающих тепловые нагрузки в условиях аварийных ситуаций	76
---	----

Энергетика и электротехника

<i>Базаров А.А., Навасардян А.А.</i> Электро-гидродинамические процессы в электромагнитном кристаллизаторе кремния	87
<i>Зубков Ю.В., Верещагин В.Е.</i> Проектирование активной зоны якоря тягового двигателя	102
<i>Стариков А.В., Казанцев А.А., Косорлуков И.А.</i> Обоснование целесообразности применения частотных преобразователей в станциях управления погружными центробежными насосами	115
<i>Кацай А.В., Шевлюгин М.В.</i> Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта.....	127
<i>Котенев В.И., Котенев А.В., Стулов А.Д.</i> Управление коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения в функции мощности потребителей и потерь в трансформаторах.....	142

Информационные технологии и коммуникации

УДК 519.876.5

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ НЕФТИ ПО МАГИСТРАЛЬНОМУ ТРУБОПРОВОДУ ПРИ НАЛИЧИИ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ДАВЛЕНИЯ¹

*А.А. Афиногентов, Ю.А. Тычинина**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: pondex@yandex.ru

Аннотация. *Магистральный нефтепровод ввиду его пространственной протяженности может рассматриваться как объект управления с распределенными параметрами (ОРП). Зависимости от времени и координаты скорости потока и давления в трубопроводе рассматриваются в качестве управляемых выходных величин ОРП. Краевая задача математического моделирования процесса трубопроводного транспорта нефти в стандартной форме представлена в виде линейного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка. В работе представлено решение краевой задачи математического моделирования нестационарного течения нефти по магистральному трубопроводу при наличии внутренних сосредоточенных источников давления в виде функций, описывающих зависимости от времени и пространственной координаты давлений и средних по сечению трубопровода скоростей потока нефти. Для представления решения краевой задачи в форме интегралов свертки получены функции Грина и стандартизирующие функции, что позволяет использовать негладкие (разрывные) зависимости для описания программ изменения во времени величин внутренних сосредоточенных источников давления. Полученные решения позволяют использовать методы теории оптимального управления системами с распределенными параметрами для решения задач оптимального управления процессом трубопроводного транспорта нефти.*

Ключевые слова: магистральный нефтепровод, математическое моделирование, объект с распределенными параметрами, краевая задача, аналитическое решение, функция Грина, стандартизирующая функция

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00353.

* Афиногентов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент.
Тычинина Юлия Александровна, кандидат технических наук, доцент.

Введение

Магистральные трубопроводы (МТП), предназначенные для транспортировки нефти и нефтепродуктов, имеют большую протяженность, ввиду чего с позиции задачи управления их следует рассматривать как объекты с распределенными параметрами (ОРП) [1–4]. Для решения широкого круга прикладных задач оптимального управления системами с распределенными параметрами, таких как поиск оптимальных программ управления и синтез систем регулирования с обратной связью, востребованными остаются аналитические модели управляемых процессов [3–7]. Такие проблемно-ориентированные модели могут быть получены путем решения соответствующих краевых задач математической физики [8–11]. Проблемная ориентированность моделей для целей синтеза систем оптимального управления подразумевает применение специальных методов решения краевой задачи, в частности метода функций Грина [2, 9–11].

Движение условно несжимаемой нефти по трубопроводу постоянного диаметра описывается уравнениями математической физики гиперболического типа [8, 9]. В частности, в работах [1, 5] на основе системы одномерных уравнений нестационарного движения жидкости И.А. Чарного [12], широко используемой для описания гидродинамики магистральных нефтепроводов [13, 14], предложена краевая задача математического моделирования процесса трубопроводного транспорта нефти при наличии внутренних сосредоточенных источников давления и расхода. Численное решение задачи получено в работе [1], в работах [4, 5] с использованием метода функций Грина получено решение линеаризованной задачи для пространственно-временного распределения скорости потока при наличии в трубопроводе внутренних сосредоточенных источников давления. В то же время более востребованными для решения задач оптимального управления режимами работы магистральных нефтепроводов являются модели, описывающие пространственно-временное распределение внутренних давлений в трубопроводе [5, 12–14]. В статье будет представлено аналитическое решение описанной выше краевой задачи математического моделирования процесса трубопроводного транспорта нефти для пространственно-временного распределения давлений в МТП при наличии внутренних источников давления, сосредоточенных в некоторых точках расположения нефтеперекачивающих станций (НПС).

Краевая задача математического моделирования нестационарного течения нефти по магистральному трубопроводу при наличии внутренних источников давления

Взаимосвязь внутреннего избыточного давления P и средней по сечению скорости ω потока нефти плотностью ρ , движущейся по трубопроводу постоянного диаметра D и длиной L , в любой точке x , $x \in [0, L]$ по направлению движения потока и в любой момент времени t , $t \geq 0$ описывается согласно [1, 10–14] системой двух одномерных дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} = -\rho \cdot \left(\frac{\partial \omega(x,t)}{\partial t} + 2 \cdot \bar{v} \cdot \omega(x,t) + \bar{v}_0 + g \cdot \sin \alpha(x) \right) + u(x,t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = -c^2 \cdot \rho \cdot \frac{\partial \omega(x,t)}{\partial x}, \quad (2)$$

где $\alpha(x)$ – угол наклона оси трубопровода к произвольной горизонтальной поверхности; g – ускорение свободного падения; c – скорость распространения волн в жидкости, текущей в стальной трубе с толщиной стенки d , определяется по формуле Жуковского [1, 12, 14].

Система уравнений (1), (2) дополняется начальными условиями

$$\omega(x, 0) = \omega_0 \quad (3)$$

или соответствующими условиям (3) начальными условиями

$$P(x, 0) = P_0 - \rho \cdot (\bar{v}_0 \cdot x + 2 \cdot \bar{v} \cdot \omega_0 \cdot x + g \cdot z(x)), \quad (4)$$

описывающими исходное стационарное состояние в трубопроводе, которое сохраняется до момента $\tau_{s_k} \geq 0$ появления в некоторой внутренней точке с координатой x_k источника давления, величина которого во времени меняется согласно зависимости $u_{s_k}(t)$. В (1) и (4) \bar{v}_0 и \bar{v} – коэффициенты линеаризации. Тогда в уравнении (1) функция распределения $u(x, t)$ по длине трубопровода внутренних источников давления, приложенных в точках $x_k \in [0, L]$ расположения НПС, имеет вид

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^K \sum_{s_k=1}^{S_k} u_{s_k}(t) \cdot \delta(x - x_k), \quad (5)$$

где $\delta(x - x_k)$ – функции Дирака; $k = \overline{1, K}$ – индекс работающих НПС; $s_k = \overline{1, S_k}$ – индекс работающих на каждой k -ой НПС насосных агрегатов.

Граничные условия краевой задачи формулируются с учетом допущения, что при наличии больших резервуаров в начале и конце МТП изменение уровней залива и потерь давления в коммуникациях начального и конечного пунктов за время протекания нестационарных процессов будет несущественным по сравнению с давлениями в линейной части МТП. Тогда в качестве граничных можно принять условия

$$P(0, t) = P_0, \quad P(L, t) = P_L \quad (6)$$

или соответствующие условиям (6) граничные условия

$$\frac{\partial \omega(0, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \omega(L, t)}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Совместно уравнения (1), (2) с начальными условиями (3), (4) и граничными условиями (6), (7) составляют краевую задачу математического моделирования нестационарного течения нефти по магистральному трубопроводу при наличии внутренних источников давления с пространственно-временной функцией распределения в форме (5).

Схемы линеаризации уравнения (1) описаны в [10, 12] и основаны на замене произведения нелинейной функции гидравлических потерь $\lambda(\omega)$ и квадрата средней скорости потока ω в трубопроводе линейной зависимостью

$$\frac{\lambda(\omega(x, t)) \cdot \omega^2(x, t)}{2 \cdot D} = 2 \cdot \bar{v} \cdot \omega(x, t) + \bar{v}_0, \quad (8)$$

как показано на рис. 1.

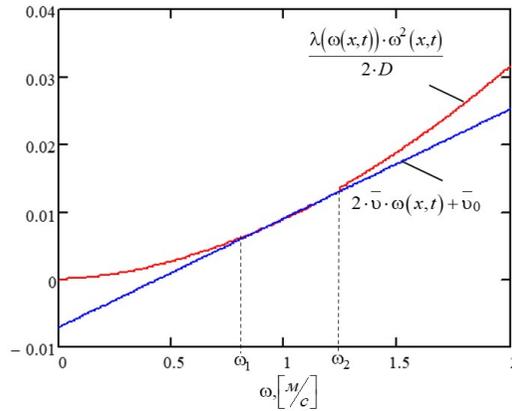


Рис. 1. Схема выбора коэффициентов линеаризации уравнения (1)

Схема выбора коэффициентов линеаризации (см. рис. 1) содержит две точки пересечения прямой $2 \cdot \bar{v} \cdot \omega + \bar{v}_0$ и исходной нелинейной зависимости $\frac{\lambda(\omega) \cdot \omega^2}{2 \cdot D}$, которая может быть построена по формулам гидравлических сопротивлений для зоны гидравлически гладких труб и зоны смешанного трения турбулентного режима течения [15], характерных для большинства режимов транспортировки нефти и нефтепродуктов.

Система уравнений (1), (2) приводится в работах [10, 11] к каноническому виду в форме

$$\frac{\partial^2 \omega(x,t)}{\partial t^2} - c^2 \cdot \frac{\partial^2 \omega(x,t)}{\partial x^2} + 2 \cdot \bar{v} \cdot \frac{\partial \omega(x,t)}{\partial t} = \frac{U(x,t)}{\rho}, \quad (9)$$

где $U(x,t)$ определяется как

$$U(x,t) = \sum_{k=1}^K \sum_{s_k=1}^{S_k} \frac{du_{s_k}(t)}{dt} \cdot \delta(x - x_k) = \sum_{k=1}^K \sum_{s_k=1}^{S_k} u'_{s_k}(t) \cdot \delta(x - x_k). \quad (10)$$

В качестве типовой программы пуска (останова) насосного агрегата может рассматриваться программа с постоянной скоростью роста ($+u_{s_k}^{\max}$) или снижения ($-u_{s_k}^{\max}$) перепада давления на насосе, приведенная в [5], функциональная зависимость от времени которой имеет вид

$$u_{s_k}(t) = \begin{cases} 0 & , t < t_{s_k}, \\ \pm u_{s_k}^{\max} \cdot t & , t_{s_k} \leq t \leq (t_{s_k} + \Delta), \\ \pm u_{s_k}^{\max} \cdot \Delta & , t > (t_{s_k} + \Delta), \end{cases} \quad (11)$$

$$u'_{s_k}(t) = \begin{cases} 0 & , t < t_{s_k}, \\ \pm u_{s_k}^{\max} & , t_{s_k} \leq t \leq (t_{s_k} + \Delta) \\ 0 & , t > (t_{s_k} + \Delta) \end{cases} \quad (12)$$

и приведена на рис. 2.

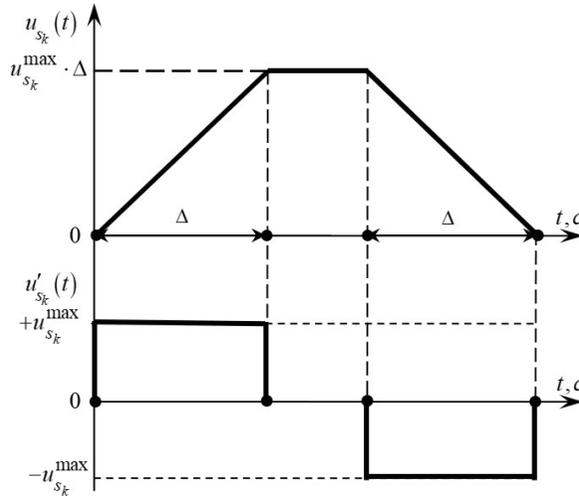


Рис. 2. Программа пуска и останова s_k -го насосного агрегата k -й НПС

Стандартная форма, функция Грина и стандартизирующая функция краевой задачи математического моделирования нестационарного течения нефти по магистральному трубопроводу при наличии внутренних источников давления

Аналитическое решение задачи относительно скорости потока жидкости в трубопроводе получено в [11] с помощью метода функций Грина. Представим краевую задачу (9) относительно пространственно-временной функции распределения скоростей потока $\omega(x, t)$ с начальными условиями (3), граничными условиями (7) и функцией распределения внутренних источников давления (10) в стандартной форме. Под стандартной формой будем понимать эквивалентную задаче (9), (3), (7), (10) краевую задачу с нулевыми начальными и однородными граничными условиями [2–4, 9]. Характеристикой краевой задачи в стандартной форме или ее импульсной переходной функцией будет являться функция Грина

$$G_{\omega}(x, \xi, t - \tau), \quad (13)$$

такая, что позволяет получить аналитическую зависимость для $\omega(x, t)$ в виде интеграла

$$\omega(x, t) = \int_0^t \int_0^L G_{\omega}(x, \xi, t - \tau) \cdot w_{\omega}(\xi, \tau) d\xi d\tau, \quad (14)$$

где $w_{\omega}(\xi, \tau)$ – стандартизирующая функция, позволяющая представить исходную краевую задачу (9), (3), (7), (10) с ненулевыми начальными и, в общем слу-

чае, неоднородными граничными условиями в виде эквивалентной краевой задачи с нулевыми начальными и однородными граничными условиями.

С учетом аналитического решения рассматриваемой краевой задачи относительно скорости потока жидкости в трубопроводе $\omega(x, t)$, полученной в [11], и правил, установленных в [2–4], получим следующие выражения для $G_\omega(x, \xi, t - \tau)$:

$$G_\omega(x, \xi, t - \tau) = \frac{1}{L} \cdot \left(\frac{e^{2\alpha(t-\tau)} - 1}{2 \cdot \alpha} + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sum_{n=1}^{N^*} \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot \xi}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L}\right) \cdot \left(\frac{e^{\alpha(t-\tau)} \cdot \text{sh}(\beta_n \cdot (t-\tau))}{\beta_n} \right) + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sum_{n=N^*+1}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot \xi}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L}\right) \cdot \left(\frac{e^{\alpha(t-\tau)} \cdot \sin(\beta_n^* \cdot (t-\tau))}{\beta_n^*} \right) \right), \\ \alpha = -\bar{v}, \quad \beta_n = \sqrt{\bar{v}^2 - \left(\frac{\pi \cdot n \cdot c}{L}\right)^2}, \quad \beta_n^* = \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot n \cdot c}{L}\right)^2 - \bar{v}^2}, \quad N^* = \left\lfloor \frac{L \cdot \bar{v}}{\pi \cdot c} \right\rfloor, \quad (15)$$

где N^* – целое число, полученное округлением в меньшую сторону отношения $\frac{L \cdot \bar{v}}{\pi \cdot c}$. Выражение для стандартизирующей функции $w_\omega(\xi, \tau)$ принимает вид

$$w_\omega(\xi, \tau) = (2 \cdot \bar{v} \cdot \delta(\tau) + \delta'(\tau)) \cdot \omega_0 + \frac{U(\xi, \tau)}{\rho}. \quad (17)$$

Проинтегрировав в (14) по пространственной координате ξ , с учетом свойств δ -функции и линейности интеграла свертки получим выражение для $\omega(x, t)$ в более простом виде:

$$\omega(x, t) = \omega_0 + \frac{1}{\rho} \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{s_k=1}^{S_k} \int_0^t G_\omega(x, x_k, t - \tau) \cdot u'_{s_k}(\tau) d\tau. \quad (18)$$

Аналитическое решение исходной краевой задачи относительно пространственно-временного распределения давлений $P(x, t)$ можно получить в виде функции Грина $G_p(x, \xi, t - \tau)$ путем подстановки (15) в уравнение (2) и последующего интегрирования результата подстановки

$$\frac{1}{c^2 \cdot \rho} \cdot \frac{\partial G_p(x, \xi, t - \tau)}{\partial t} = \frac{\partial G_\omega(x, \xi, t - \tau)}{\partial x} = \\ = -\frac{2}{L} \cdot \sum_{n=1}^{N^*} \frac{\pi \cdot n}{L} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot \xi}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L}\right) \cdot \underbrace{\left(\frac{e^{\alpha(t-\tau)} \cdot \text{sh}(\beta_n \cdot (t-\tau))}{\beta_n} \right)}_{f_{1n}(t)} - \quad (19)$$

$$-\frac{2}{L} \cdot \sum_{n=N^*+1}^{\infty} \frac{\pi \cdot n}{L} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot \xi}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L}\right) \cdot \underbrace{\left(\frac{e^{\alpha \cdot (t-\tau)} \cdot \sin(\beta_n^* \cdot (t-\tau))}{\beta_n^*}\right)}_{f_{2n}(t)}$$

по схеме, приведенной далее, и составления новой стандартизирующей функции $w_p(\xi, \tau)$, удовлетворяющей начальным условиям (4) и граничным условиям (6).

Интегрирование по t правой части (19) сводится к получению двух интегралов:

$$I_{1n}(t) = \int f_{1n}(t) dt, \quad (20)$$

$$I_{2n}(t) = \int f_{2n}(t) dt. \quad (21)$$

Введем новые переменные интегрирования:

$$\varphi_1 = \beta_n \cdot (t - \tau), \quad (22)$$

$$\varphi_2 = \beta_n^* \cdot (t - \tau). \quad (23)$$

Тогда (20), (21) примут вид

$$I_{1n}(\varphi_1) = \frac{1}{\beta_n} \int f_{1n}(\varphi_1) d\varphi_1, \quad (24)$$

$$I_{2n}(\varphi_2) = \frac{1}{\beta_n^*} \int f_{2n}(\varphi_2) d\varphi_2, \quad (25)$$

Получение интеграла (24) не представляет особой сложности после раскрытия выражения для $\text{sh}(\varphi_1)$. Результат интегрирования (24) имеет вид

$$I_{1n}(\varphi_1) = \frac{e^{k_1 \cdot \varphi_1}}{2 \cdot \beta_n^2} \cdot \left(\frac{e^{\varphi_1}}{k_1 + 1} - \frac{e^{-\varphi_1}}{k_1 - 1} \right) + C_{1n}, \quad (26)$$

$$k_1 = \frac{\alpha}{\beta_n}. \quad (27)$$

Для интегрирования (25) выделим интеграл:

$$J_{1n}(\varphi_2) = \int e^{k_2 \cdot \varphi_2} \cdot \sin(\varphi_2) d\varphi_2, \quad (28)$$

$$k_2 = \frac{\alpha}{\beta_n^*}. \quad (29)$$

Для получения решений в (28) выполним двойное интегрирование по частям и сведем интеграл к «самому себе». Для интегрирования по частям в (28) положим:

$$\vartheta = e^{k_2 \cdot \varphi_2} \Rightarrow d\vartheta = k_2 \cdot e^{k_2 \cdot \varphi_2} d\varphi_2, \quad (30)$$

$$d\sigma = \sin(\varphi_2) d\varphi_2 \Rightarrow \sigma = -\cos(\varphi_2), \quad (31)$$

тогда после первого этапа интегрирования по частям получим:

$$\begin{aligned} J_{1n}(\varphi_2) &= \int \vartheta d\sigma = \vartheta \cdot \sigma - \int \sigma d\vartheta = \\ &= -e^{k_2 \cdot \varphi_2} \cdot \cos(\varphi_2) + k_2 \cdot \int e^{k_2 \cdot \varphi_2} \cdot \cos(\varphi_2) d\varphi_2. \end{aligned} \quad (32)$$

Для повторного интегрирования по частям (32) положим вместо (31)

$$d\sigma = \cos(\varphi_2)d\varphi_2 \Rightarrow \sigma = \sin(\varphi_2), \quad (33)$$

тогда после второго этапа интегрирования по частям (32) примет вид

$$\begin{aligned} J_{1n}(\varphi_2) &= \int \vartheta d\sigma = \\ &= -e^{k_2 \cdot \varphi_2} \cdot \cos(\varphi_2) + k_2 \cdot e^{k_2 \cdot \varphi_2} \cdot \sin(\varphi_2) + k_2^2 \cdot \underbrace{\int e^{k_2 \cdot \varphi_2} \cdot \sin(\varphi_2) d\varphi_2}_{J_{1n}(\varphi_2)}. \end{aligned} \quad (34)$$

Как видно из выражения (34), интеграл $J_{1n}(\varphi_2)$ свелся к «самому себе», и после незначительных преобразований получим

$$J_{1n}(\varphi_2) = \frac{e^{k_2 \cdot \varphi_2}}{1 + k_2^2} \cdot (k_2 \cdot \sin(\varphi_2) - \cos(\varphi_2)) + C_{21n}. \quad (35)$$

Выражение для (21) примет вид

$$I_{2n}(\varphi_2) = \frac{1}{\beta_n^{*2}} \cdot \frac{e^{k_2 \cdot \varphi_2}}{1 + k_2^2} \cdot (k_2 \cdot \sin(\varphi_2) - \cos(\varphi_2)) + C_{2n}. \quad (36)$$

После подстановки (22) и (27) в (26) получим:

$$I_{1n}(t) = \frac{e^{\alpha(t-\tau)}}{2 \cdot \beta_n} \cdot \left(\frac{e^{\beta_n(t-\tau)}}{\alpha + \beta_n} - \frac{e^{-\beta_n(t-\tau)}}{\alpha - \beta_n} \right) + C_{1n}. \quad (37)$$

После подстановки (23) и (28) в (36) получим:

$$I_{2n}(t) = \frac{e^{\alpha(t-\tau)}}{\alpha^2 + \beta_n^{*2}} \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta_n^*} \cdot \sin(\beta_n^* \cdot (t-\tau)) - \cos(\beta_n^* \cdot (t-\tau)) \right) + C_{2n}. \quad (38)$$

Тогда результат интегрирования (19) окончательно примет вид:

$$\begin{aligned} G_p(x, \xi, t-\tau) &= \frac{2 \cdot c^2 \cdot \rho}{L^2} \cdot \left(\sum_{n=1}^{N^*} \pi \cdot n \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot \xi}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L}\right) \cdot I_{1n}(t) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=N^*+1}^{\infty} \pi \cdot n \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot \xi}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L}\right) \cdot I_{2n}(t) \right). \end{aligned} \quad (39)$$

Функция Грина (39) является решением задачи (1), (2) при нулевых начальных условиях, обращается в ноль при $t = 0$, начальные условия являются статическими и не зависят от τ (следовательно, можно принять $\tau = 0$), тогда постоянные интегрирования C_{1n} и C_{2n} должны удовлетворять тождеству

$$\begin{aligned} G_p(x, \xi, 0) &= \\ &= \frac{2 \cdot c^2 \cdot \rho}{L^2} \cdot \left(\sum_{n=1}^{N^*} \pi \cdot n \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot \xi}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L}\right) \cdot \left(-\frac{1}{\alpha^2 - \beta_n^2} + C_{1n} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=N^*+1}^{\infty} \pi \cdot n \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot \xi}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L}\right) \cdot \left(-\frac{1}{\alpha^2 + \beta_n^{*2}} + C_{2n} \right) \right) = 0. \end{aligned} \quad (40)$$

Отсюда C_{1n} и C_{2n} определяются как

$$C_{1n} = \frac{1}{\alpha^2 - \beta_n^2}, C_{2n} = \frac{1}{\alpha^2 + \beta_n^{*2}}. \quad (41)$$

Соответствие граничных условий (7) условиям (6) и начальных условий (3) условиям (4) позволяет провести замену ω_0 в (17) следующим выражением:

$$\omega_0 = \frac{P_0 - P_L}{2 \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot L} + g \cdot \frac{z(0) - z(L)}{2 \cdot \bar{v} \cdot L} - \frac{\bar{v}_0}{2 \cdot \bar{v}}, \quad (42)$$

после чего вместо стандартизирующей функции $w_\omega(\xi, \tau)$ для граничных условий (7) и начальных условий (3) можно использовать функцию $w_p(\xi, \tau)$ для граничных условий (6) и начальных условий (4) в форме

$$w_p(\xi, \tau) = (2 \cdot \bar{v} \cdot \delta(\tau) + \delta'(\tau)) \cdot \left(\frac{P_0 - P_L}{2 \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot L} + g \cdot \frac{z(0) - z(L)}{2 \cdot \bar{v} \cdot L} - \frac{\bar{v}_0}{2 \cdot \bar{v}} \right) + \frac{U(\xi, \tau)}{\rho}, \quad (43)$$

а аналитическое решение краевой задачи (1), (2) относительно $P(x, t)$ находится в виде интеграла:

$$P(x, t) = \int_0^t \int_0^L G_p(x, \xi, t - \tau) \cdot w_p(\xi, \tau) d\xi d\tau. \quad (44)$$

Проинтегрировав в (44) по пространственной координате ξ аналогично (18), получим решение для $P(x, t)$ в виде

$$P(x, t) = p_0(x) + \sum_{k=1}^K \sum_{s_k=1}^{S_k} \int_0^t G_p(x, x_k, t - \tau) \cdot u'_{s_k}(\tau) d\tau, \quad (45)$$

где

$$p_0(x) = P_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) + P_L \cdot \frac{x}{L} + \rho \cdot g \cdot \left(z(0) \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) - z(x) + z(L) \cdot \frac{x}{L} \right). \quad (46)$$

Сравнительный анализ результатов аналитического и численного решения краевой задачи

Полученные интегральные формы (18) и (45) позволяют получить в аналитическом виде в любой момент времени функции распределения давлений и средних скоростей потока нефти по длине магистрального трубопровода при наличии внутренних источников давления, которые в достаточной мере описывают гидродинамику изотермических нефтепроводов. Методика численного решения в пакете MathCAD нелинейной краевой задачи математического моделирования гидродинамики магистрального нефтепровода представлена в работе [1].

В данном разделе приводится сравнение результатов аналитического решения в форме (18), (45) и численного решения по методике [1] линеаризованной краевой задачи (1) – (7) на примере технологического участка магистрального трубопровода, имеющего протяженность $L = 200$ км, внутренний диаметр $D = 1200$ мм. Транспортируемый продукт – нефть плотностью $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$, вязкостью $\nu = 25 \text{ сСт}$, для условий течения которой определены коэффициенты линеаризации $\bar{v}_0 = -7.14 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2$, $\bar{v} = 0.016 \text{ с}^{-1}$ согласно схеме (см. рис. 1).

В начальный момент времени режим течения нефти в трубопроводе стационарный со средней по сечению скоростью потока $\omega_0 = 0.94 \text{ м/с}$, давления

в начале и в конце трубопровода составляют соответственно $P_0 = 4 \times 10^6 \text{ Па}$, $P_L = 1 \times 10^5 \text{ Па}$, профиль трассы ровный. В момент времени $\tau_{pk} = 0$ в точке расположения НПС $x_{pk} = 100 \text{ км}$ происходит пуск насосного агрегата по программе (11), (12) с параметрами $u_{pk}^{\max} = 2 \times 10^5 \text{ Па/с}$ и $\Delta = 10 \text{ с}$. Для расчетов учитывались первые 400 членов ряда в (15) и (40), при $N^* = I$ численный расчет по методике [1] реализован на сетке размером 400×400 .

Результаты расчетов распределения по длине трубопровода средних по сечению скоростей потока представлены на рис. 3, распределения давлений – на рис. 4 для четырех моментов времени (10 с, 35 с, 70 с, 200 с).

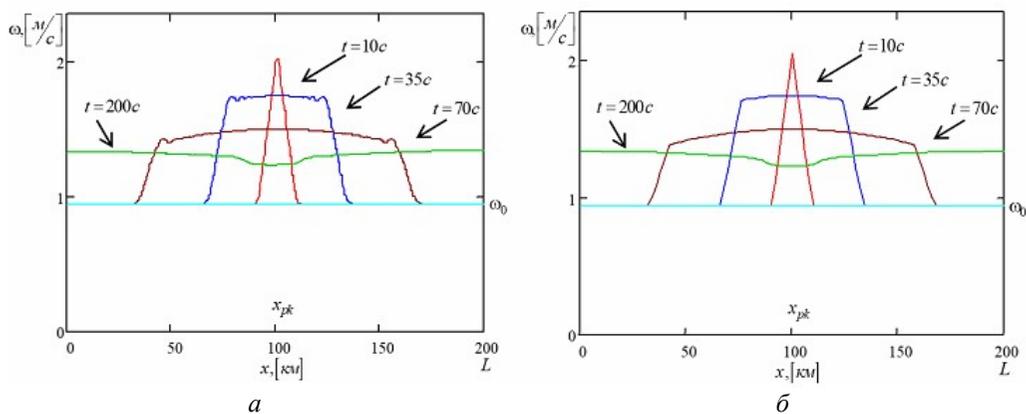


Рис. 3. Распределение скорости потока по длине трубопровода в различные моменты времени: *а* – численное решение; *б* – аналитическое решение

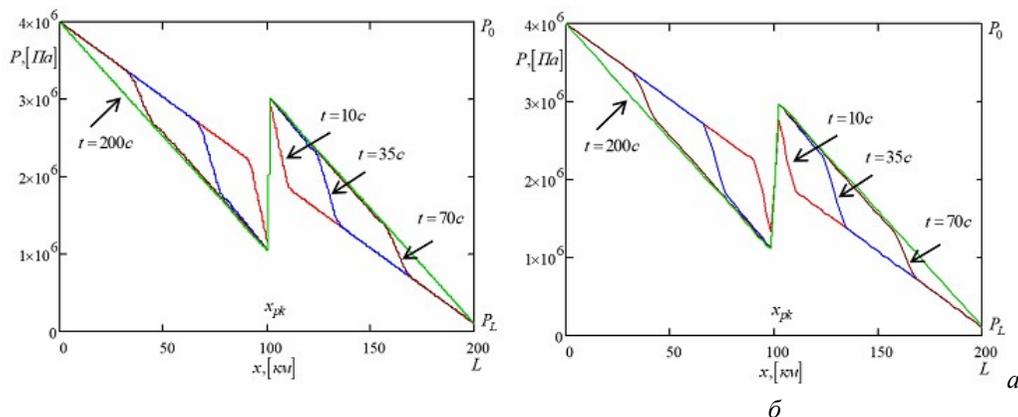


Рис. 4. Распределение давления по длине трубопровода в различные моменты времени: *а* – численное решение; *б* – аналитическое решение

Сравнительный анализ результатов численного и аналитического решения линеаризованной краевой задачи (1) – (7) показывает:

– высокую степень совпадения результатов расчетов во временной области: характер распределения функций $P(x, t)$ и $\omega(x, t)$, в частности положение фронта волны давления (скорости потока), полученные как по численной, так и по аналити-

ческой модели, совпадают в моменты времени, отличные друг от друга менее чем на 1 %;

– высокую степень совпадения результатов расчетов по пространственной координате: абсолютные значения функций $P(x,t)$ и $\omega(x,t)$, полученные как по численной, так и по аналитической модели и совпадающие по характеру в некоторые моменты времени, отличаются друг от друга менее чем на 1 %;

– зависимость точности совпадения результатов расчетов от количества узлов сетки численной модели (шага расчета по пространственной и временной координате) и количества членов ряда в (15) и (40). Указанная выше точность совпадения результатов расчетов достигается для следующих параметров численной и аналитической моделей: шаг сетки по пространственной координате численной модели $\Delta x \leq 0.5$ км, шаг сетки по временной координате численной модели $\Delta t \leq 0.5$ с, количество членов ряда в (15) и (40) $n \geq 400$.

Заключение

В работе представлено аналитическое решение краевой задачи математического моделирования нестационарного течения нефти по магистральному трубопроводу в виде функций, описывающих зависимости от времени и пространственной координаты давлений и средних по сечению трубопровода скоростей потока нефти, рассматриваемых в качестве управляемых величин объекта управления с распределенными параметрами, при наличии внутренних источников давления, сосредоточенных в точках расположения нефтеперекачивающих станций.

Получены функции Грина и стандартизирующие функции для представления решения краевой задачи в форме интегралов свертки, что позволяет использовать негладкие (разрывные) функции для описания программ изменения во времени внутренних сосредоточенных источников давления, рассматриваемых в качестве управляющих воздействий для объекта управления с распределенными параметрами.

Проведенный сравнительный анализ результатов численного и аналитического решений краевой задачи показал высокую степень совпадения результатов расчетов во временной и пространственной области. Позволил определить требования к параметрам численной и аналитической моделей, обеспечивающих высокую точность решения краевой задачи.

Полученные в работе аналитические зависимости от времени и пространственной координаты давлений и средних по сечению трубопровода скоростей потока нефти позволяют приступить к решению задач оптимального программного управления и задач синтеза замкнутых систем регулирования процесса транспортировки нефти по магистральному трубопроводу с использованием методов теории оптимального управления системами с распределенными параметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афиногентов А.А., Плешивцева Ю.Э., Снопков А.С. Математическое моделирование управляемых гидродинамических процессов трубопроводного транспорта жидких углеводородов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2010. № 7(28). С. 137–144.
2. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1979. 224 с.
3. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975. 568 с.

4. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2009. 677 с.
5. *Афиногентов А.А., Плишивцева Ю.Э., Ефимов А.П.* Оптимальное по быстродействию управление переходными режимами работы магистрального нефтепровода // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2011. № 3(31). С. 6–13.
6. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2003. 300 с.
7. *Рапопорт Э.Я.* Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2005. 292 с.
8. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 724 с.
9. *Арсенин В.Я.* Методы математической физики и специальные функции. М.: Наука, 1984. 384 с.
10. *Афиногентов А.А., Тычинина Ю.А.* Решение краевой задачи математического моделирования процесса трубопроводного транспорта нефти методом Фурье // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2013. № 2(38). С. 188–196.
11. *Афиногентов А.А., Тычинина Ю.А., Попов А.В.* Решение краевой задачи математического моделирования процесса трубопроводного транспорта нефти методом функций Грина // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2014. № 2(42). С. 164–173.
12. *Чарный И.А.* Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. 296 с.
13. *Мирзаджанзаде А.Х., Галлямов А.К., Марон В.И., Юфин В.А.* Гидродинамика трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1984. 287 с.
14. *Лурье М.В.* Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. 456 с.
15. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Статья поступила в редакцию 12 августа 2022 г.

ANALYTICAL SOLUTION OF THE BOUNDARY VALUE PROBLEM OF MATHEMATICAL MODELING FOR NON-STATIONARY OIL FLOWS THROUGH THE TRUNK PIPELINE IN THE PRESENCE OF INTERNAL PRESSURE SOURCES

*A.A. Afinogentov, Yu.A. Tychinina*¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: pondex@yandex.ru

Abstract. *The main oil pipeline, due to its spatial extent, can be considered as a control object with distributed parameters (ODP). The dependences on time and coordinates of the flow velocity and pressure in the pipeline are considered as controlled output values of the ODP. The boundary value problem of mathematical modeling of the process of pipeline transportation of oil in the standard form is presented in the form of a linear partial differential equation of the second order. The paper presents a solution to the boundary value problem of mathematical modeling of unsteady oil flow through a trunk pipeline in the presence of internal concentrated pressure sources in the form of functions describing the dependences on time and spatial coordinates of pressures and average cross-section pipeline oil flow rates. To represent the solution of the boundary value problem in the form of convolution integrals, Green's functions and standardizing functions are obtained, which makes it possible to use non-smooth (discontinuous) dependencies to describe programs for changing the values of internal concentrated pressure sources over time. The solutions obtained make it possible to use the methods of the theory of optimal control of systems with distributed parameters to solve the problems of optimal control of the process of pipeline transportation of oil.*

Keywords: *trunk oil pipeline, mathematical modeling, object with distributed parameters, boundary value problem, analytical solution, Green's function, standardizing function*

REFERENCES

1. *Afinogentov A.A., Pleshivceva Yu.E., Snopkov A.S.* Matematicheskoe modelirovanie upravlyaemykh gidrodinamicheskikh processov truboprovodnogo transporta zhidkih uglevodorodov // Vestn. Samar. gosud. tekhn. un-ta. Ser.: Tekhnicheskie nauki. 2010. № 7(28). P. 137–144.
2. *Butkovskij A.G.* Harakteristiki sistem s raspredelennymi parametrami. M.: Nauka, 1979. 224 pp.
3. *Butkovskij A.G.* Metody upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami. M.: Nauka, 1975. 568 pp.
4. *Rapoport E.Ya.* Optimal'noe upravlenie sistemami s raspredelennymi parametrami. M.: Vyssh. shk., 2009. 677 pp.
5. *Afinogentov A.A., Pleshivtseva Yu.E., Efimov A.P.* Optimal'noe po bystrodejstvii upravlenie perekhodnymi rezhimami raboty magistral'nogo nefteprovoda // Vestn. Samar. gosud. tekhn. un-ta. Ser.: Tekhnicheskie nauki. 2011. № 3(31). P. 6–13.
6. *Rapoport E.Ya.* Strukturnoe modelirovanie ob"ektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami. M.: Vyssh. shk., 2003. 300 pp.
7. *Rapoport E.Ya.* Analiz i sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya s raspredelennymi parametrami. M.: Vyssh. shk., 2005. 292 pp.
8. *Tihonov A.N., Samarskij A.A.* Uravneniya matematicheskoy fiziki. M.: Nauka, 1966. 724 pp.
9. *Arsenin V.Ya.* Metody matematicheskoy fiziki i special'nye funkicii. M.: Nauka, 1984. 384 pp.

¹ *Alexander A. Afinogentov (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.
Yuliya A. Tychinina (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.*

10. *Afinogentov A.A., Tychinina Yu.A.* Reshenie kraevoy zadachi matematicheskogo modelirovaniya processa truboprovodnogo transporta nefi metodom Fur'e // Vestn. Samar. gosud. tekhn. un-ta. Ser.: Tekhnicheskie nauki. 2013. № 2(38). P. 188–196.
11. *Afinogentov A.A., Tychinina Yu.A., Popov A.V.* Reshenie kraevoy zadachi matematicheskogo modelirovaniya processa truboprovodnogo transporta nefi metodom funkciy Grina // Vestn. Samar. gosud. tekhn. un-ta. Ser.: Tekhnicheskie nauki. 2014. № 2(42). P. 164–173.
12. *Charnyj I.A.* Neustanovivsheesya dvizhenie real'noj zhidkosti v trubah. M.: Nedra, 1975. 296 pp.
13. *Mirzadzhanzade A.H., Gallyamov A.K., Maron V.I., Yufin V.A.* Gidrodinamika truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov. M.: Nedra, 1984. 287 pp.
14. *Lur'e M.V.* Matematicheskoe modelirovanie processov truboprovodnogo transporta nefi, nefteproduktov i gaza. M.: RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina, 2012. 456 pp.
15. *Idel'chik I.E.* Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. M.: Mashinostroenie, 1992. 672 pp.

УДК 519.816

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

*Б.Я. Лихтциндер, П.А. Ольберг**

Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
Россия, 443100, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23

E-mail: lixt@psuti.ru, polinaolberg@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются различные виды моделирования и понятие «цифровой двойник», а также примеры их концепции и реализации. Отмечено, что компьютерное моделирование позволяет не только получить прогноз, но и определить, какие управляющие воздействия на систему приведут к благоприятному развитию событий между компонентами модели, являющимися отражением реальных связей. В качестве примера рассмотрен процесс обслуживания аккумуляторных батарей элементов беспроводных сенсорных сетей с помощью дронов. Показано, что цифровое моделирование позволяет произвести оптимизацию последовательности обслуживания с привязкой ко времени, обеспечивая минимизацию полетного времени и безусловное отсутствие полной разрядки аккумулятора любого из сенсорных элементов. В таком случае модель взаимодействует с моделируемой сетью, постоянно получая от нее актуальную информацию о состоянии, что свойственно «цифровым двойникам». Цифровые двойники могут отображать не только характеристики отдельных устройств, но и характеристики процессов. Современные производственные процессы весьма сложны и распределены в пространстве и во времени. Поэтому модели таких процессов должны учитывать распределенный характер объектов моделирования. Также проводится анализ взаимодействия цифровой модели с объектом моделирования, представляющим производственный процесс. Показано, что взаимодействие происходит через средства интеграции, обеспечивающие сопряжение модели и объекта моделирования.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровое моделирование, компьютерное моделирование, цифровая модель, среда моделирования, моделируемая сеть, система управления, прогнозирование

Введение

Все начинается с некоторого обобщенного понятия. Мы называем его «демиург», многие его называют «космос». В математике это понятие может быть отождествлено с понятием бесконечности. В рамках этого понятия выделим некоторые его составляющие, которые назовем объектами, – это могут быть скопления галактик или электроны. Не уходя в теорию относительности и параллельные миры, мы можем сказать, что каждый объект существует во времени и пространстве. Эти понятия характеризуют границы существования объекта. Каждому объекту присуще некоторое внутреннее состояние, от которого зависят его

* Лихтциндер Борис Яковлевич, профессор кафедры «Мультисервисные сети и информационная безопасность», доктор технических наук, профессор.
Ольберг Полина, студент.

свойства. Свойства можно рассматривать как некоторые проявления состояния объекта по отношению к внешней среде. С другой стороны, внешняя среда всегда оказывает на объект определенные воздействия, приводящие к изменению состояния объекта и, следовательно, изменению его свойств. Для описания состояний и свойств объекта мы часто создаем модель. Модель является другим объектом, однако к ней предъявляются требования: она должна быть адекватной, реализуемой и полезной. Модель практически никогда не отражает все свойства и все состояния объекта, она учитывает лишь те свойства и состояния, которые подлежат рассмотрению. Было бы неразумно рассматривать поведение человека в трамвае на молекулярном уровне. Адекватность модели всегда рассматривается по отношению к тем состояниям и тем свойствам, которые подлежат рассмотрению. Многие объекты способны изменять свои состояния не только в результате внешних воздействий, но также и в результате внутренних воздействий, которые происходят между частями, составляющими рассматриваемый объект. Объект, изменяющий свои состояния при отсутствии внешних воздействий, назовем свободным объектом, а процесс изменения состояний такого объекта назовем свободным процессом. Это аналогия свободным движениям в переходных процессах электротехнических систем. Внутренние воздействия в объекте почти всегда зависят от состояния объекта, в то время как внешние воздействия могут не зависеть от состояния объекта и в частном случае могут вообще отсутствовать. Такой объект назовем изолированным. Для реализуемости модели количество свойств, принадлежащих объекту, с точки зрения моделирования должно быть ограничено и конечным. Что же касается числа состояний, то для аналоговых объектов это совсем необязательно, однако если мы хотим сделать цифровую модель, то придется сделать конечным и число моделируемых состояний. Каждое состояние объекта характеризуется определенными значениями некоторой группы параметров. При моделировании должно рассматриваться некоторое конечное число параметров, характеризующих состояние объекта. Указанные параметры изменяются во времени и пространстве и, следовательно, изменение состояния объектов также происходит во времени и пространстве. Совокупность значений параметров, характеризующая состояние объектов в данный момент времени, определяет мгновенное состояние объекта. Внешние воздействия на объект в данный момент времени назовем мгновенным внешним воздействием. Совокупность мгновенных внешних воздействий и мгновенного состояния объекта определяют мгновенную ситуацию, в которой находится объект. Если изменение параметров, характеризующих состояние объекта и изменение внешних воздействий, носит непрерывный характер, то изменение ситуации также происходит непрерывно. Подмножество состояний объекта, для которых значения всех параметров, характеризующих его состояние, находятся в пределах заданных ограничений, назовем дискретным состоянием объекта, а подмножество ситуаций, для которых значения всех внутренних параметров и внешних воздействий находятся в пределах заданных ограничений, назовем дискретной ситуацией, в которой находится объект. Таким образом, каждая модель дискретной ситуации, в которой находится объект, может быть охарактеризована перечнем ограничений, в которых находятся параметры, характеризующие внутреннее состояние объекта, и перечнем параметров, характеризующих внешнее воздействие, а также перечнем ограничений на указанные параметры. Изменения параметров внутри заданных пределов не изменяет дискретную ситуацию, в которой находится объект. Выход хотя бы одного из параметров за рассматриваемые предельные зна-

чения и переход к другим предельным значениям приводят к изменению дискретной ситуации. Введение понятия дискретного состояния и дискретной ситуации позволяет значительно сократить объем информации, необходимой для их описания. С точки зрения моделирования главное состоит в том, что подобная дискретизация позволяет перейти от моделирования во времени к событийному моделированию. Событийное моделирование всегда значительно сокращает объемы требуемых вычислительных ресурсов.

Два или несколько объектов могут оказывать взаимные воздействия друг на друга. В этом случае они образуют более сложный объект, который мы назовем системой объектов. Число состояний системы равно произведению чисел соответствующих состояний каждого из объектов. Каналы, по которым объекты оказывают взаимные влияния, называют связями. В общем случае два объекта связаны двусторонними связями, однако связи могут быть и односторонними, если воздействием между объектами, т. е. воздействием одного объекта на другой, можно пренебречь.

Один и тот же объект может обладать различными видами энергии (тепловая энергия электромагнитных колебаний, механическая энергия). Существует великое множество различных форм проявления энергии, однако все они являются средством взаимодействия объектов. Объекты могут обмениваться информацией, носителями которой также являются различные формы энергии. Таким образом, мы можем говорить об информационно-энергетических воздействиях. Совокупность информационно-энергетических воздействий образует информационно-энергетическое поле, которое может излучаться или восприниматься объектом. Именно информационно-энергетическое поле является источником воздействий, причем энергетическое поле является носителем информационного поля. Все объекты, образующие систему, связаны между собой информационно-энергетическими связями, и чем эти связи прочнее, тем устойчивее становится система по отношению к внешним воздействиям. Если система состоит из большого числа равновеликих и равнозначных объектов, то связи между ними становятся достаточно слабыми, поскольку каждый объект оказывает на другой объект весьма незначительно влияние. Примером такой системы может служить рой комаров, в котором каждый комар совершает свое собственное, практически независимое от других комаров движение. Более устойчивой в указанном смысле окажется система, образующая рой пчел, следующий за своей маткой. Сила инстинкта заставляет пчел следовать за своей маткой, не давая рою разлетаться даже при достаточно сильном ветре. Другой моделью системы является, например, наша Солнечная система, где силы тяготения удерживают планеты от их схода со своих орбит. В системах, в которых объектами взаимоотношений являются люди, также действуют свои определенные информационно-энергетические связи.

Имитационное моделирование

Имитационное моделирование – это разработка и выполнение на компьютере программной системы, отражающей структуру и функционирование (поведение) моделируемого объекта или явления во времени [11]. Такую программную систему называют имитационной моделью этого объекта или явления. Объекты и сущности имитационной модели представляют объекты и сущности реального мира, а связи структурных единиц объекта моделирования отражаются в интерфейсных связях соответствующих объектов модели. Таким образом, *имитационная модель* – это упрощенное подобие реальной системы, либо существующей,

либо той, которую предполагается создать в будущем. Имитационная модель обычно представляется компьютерной программой, выполнение программы можно считать имитацией поведения исходной системы во времени.

В [10] сформулированы этапы имитационного моделирования.

Сначала разработчик модели должен определить, какие задачи будут решаться с ее помощью, т. е. моделированию в любой его форме должна предшествовать *формулировка цели моделирования*. От цели зависит то, какие процессы в реальной системе следует выделить и отразить в модели, а от каких процессов абстрагироваться, какие характеристики этих процессов учитывать, а какие – нет, какие соотношения между переменными и параметрами модели должны быть отражены в модели.

Следующий этап можно охарактеризовать как создание *концептуальной (содержательной)* модели. На нем происходит *структуризация* модели, т. е. выделение отдельных подсистем, определение элементарных компонентов модели и их связей на каждом уровне иерархии. В имитационном моделировании структура модели отражает структуру реального объекта моделирования на некотором уровне абстракции. Следующий этап – это *калибровка, или идентификация* модели, т. е. сбор данных и проведение измерений тех характеристик в реальной системе, которые должны быть введены в модель в виде значений параметров и распределений случайных величин.

Далее необходимо выполнить *проверку правильности* модели (ее *валидацию*), которая состоит в том, что выход модели проверяется на нескольких тестовых режимах, в которых характеристики поведения реальной системы известны либо очевидны.

Последним этапом работы с моделью является *компьютерный эксперимент*, т. е. собственно то, ради чего и создавалась модель. В простейшем случае компьютерный эксперимент – это запуск на исполнение модели при различных значениях ее существенных параметров (факторов) и наблюдение ее поведения с регистрацией характеристик поведения. Этот вид использования модели называется прогнозом, или экспериментом типа «*что будет, если...*».

Прогнозирование

Важнейшими этапами любого цикла управления являются формирование управляющего воздействия и контроль за результатами этих воздействий. Первый этап выполняется на основе выработки и принятия решений, второй нужен для завершения цикла управления и перехода к следующей итерации. Условием успешности выполнения указанных этапов является наличие актуальной информации о параметрах состояния управляемой системы, взаимодействующих систем и условиях их взаимодействия. В простейшем случае указанная информация получается путем периодического контроля параметров управляемой системы с последующим сравнением с требуемыми значениями указанных параметров и выработкой очередного управляющего воздействия. Вследствие инерционности управляемой системы, а также ее распределенности в пространстве информация о ее параметрах может поступать с запаздыванием, что приводит к ухудшению качества процесса управления.

Для решения проблемы необходимо иметь возможность прогнозирования изменений состояния системы на некоторый период времени, обеспечивающий опережение принятия решения, то есть создать некоторую опережающую обратную связь. Основа такой связи – прогнозирование состояния системы на некото-

рый период времени, опережающий ее текущее положение с учетом реализации управляющих воздействий [1 – 3]. Иногда прогнозирование разделяют на активное и пассивное. Первое обеспечивает оценку возможных последствий принимаемых решений, то есть дает ответ на вопрос «что будет, если сделать то-то». Второе оценивает возможное состояние системы через некоторое время, если условия ее функционирования останутся неизменными, то есть отвечает на вопрос «что будет, если ничего не предпринимать». Для управления динамическими системами целесообразно использовать активное прогнозирование. Однако для систем с высоким уровнем собственной инерционности, а также для распределенных в пространстве систем реализация управления на основе активного прогнозирования затруднена тем, что информация поступает с большим запаздыванием и к моменту поступления может стать неактуальной.

Цифровые двойники

Активный прогноз поведения системы можно осуществить с помощью моделирования.

Компьютерное моделирование позволяет не только получить прогноз, но и определить, какие управляющие воздействия на систему приведут к благоприятному развитию событий между компонентами модели, являющимися отражением реальных связей [4]. То есть компьютерная модель может быть частью системы управления объектом. Для этого вычислительные процессы в модели должны проходить быстрее, чем происходят изменения объекта в реальном времени.

С повышением динамичности управляемых систем, развитием скоростных компьютерных сетей и методов работы с большими массивами информации Big Data [5] такая возможность появилась. Подобные модели получили название «цифровые двойники» [6, 7].

В промышленных и научных источниках определения «цифрового двойника» отличаются. Согласно некоторым из них, цифровой двойник является интегрированной моделью уже построенного продукта, которая призвана содержать информацию обо всех дефектах изделия и регулярно обновляться в процессе физического использования [5]. Другим распространенным определением является цифровая модель, полученная на основании информации от датчиков, установленных на физическом объекте, которая позволяет симулировать поведение объекта в реальном мире [4]. Однако, по нашему мнению, важным отличием цифрового двойника от обычной модели является наличие интерфейсных связей, аналогичных тем, с помощью которых моделируемый объект общается с внешним миром. Если поведение таких объектов носит непрерывный характер, результаты цифрового моделирования должны быть преобразованы в аналоговую форму. Результаты моделирования могут передаваться объекту через оператора. В этом случае оператор оказывается включенным в цепь управления. Параметры поведения объекта, полученные в результате управляющих воздействий, преобразуются в цифровую форму и поступают на входы цифровой модели. После завершения очередного этапа моделирования полученные цифровые результаты преобразуются в аналоговую форму и поступают на входы объекта управления в виде управляющих воздействий. Процесс циклически повторяется до достижения желаемого состояния управляемого объекта.

На рис. 1 представлена обобщенная схема применения модели в виде цифрового двойника в системе управления. В быстродействующую цифровую мо-

дель, отражающую ситуацию объекта моделирования, вводятся исходные управляющие данные. Полученные результаты моделирования анализируются, изменяются и вновь поступают на вход модели. Таким образом осуществляется активное прогнозирование и получение оптимального решения, которое через средства сопряжения формирует управляющие воздействия, поступающие на объект управления с цифрового двойника в системе управления.

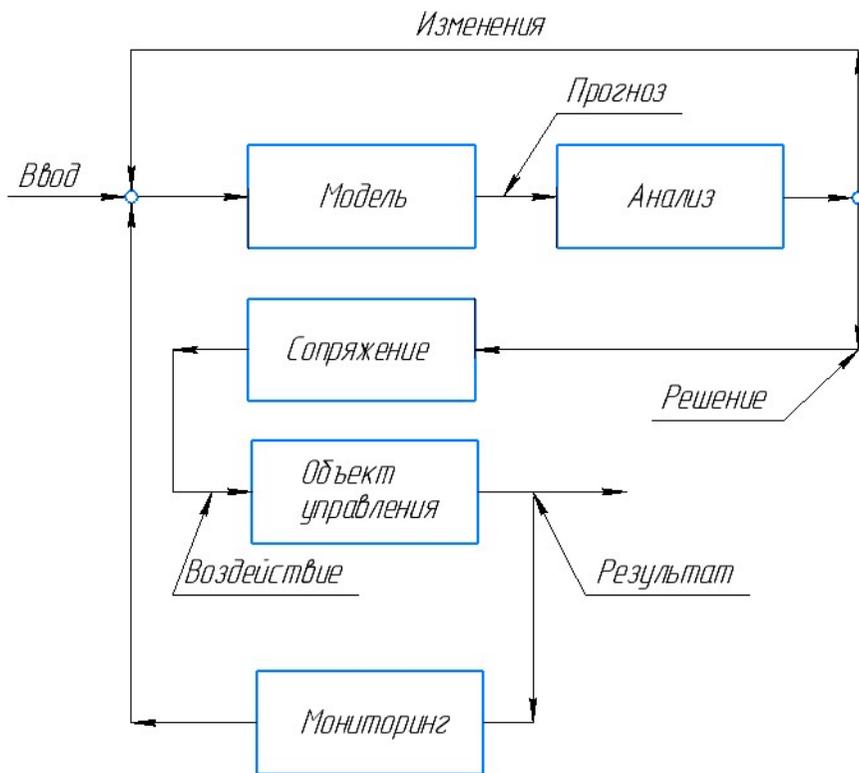


Рис. 1. Обобщенная схема применения модели в виде цифрового двойника

Производится постоянный мониторинг результатов указанных воздействий. Данные мониторинга вновь вводятся в модель, и цикл управления повторяется. Быстродействие модели обеспечивает возможность выполнения «обратной» задачи моделирования и получение оптимального решения в реальном масштабе времени. В качестве средств сопряжения модели с объектом управления может выступать оператор. Наличие цифрового двойника обеспечивает получение оператором оптимального решения при выборе управляющих воздействий.

Применяемый при создании цифровых двойников математический аппарат зависит от сложности объекта и степени формализуемости задачи.

Различают два вида моделей, применяемых при создании цифровых двойников: это модели временных рядов и модели предметной области [3].

1. Модели временных рядов – это такие модели, которые обеспечивают поиск зависимостей будущих значений состояний объекта от истории изменения этих состояний и построение прогноза по этим зависимостям. Эти модели универсальны для различных предметных областей и не зависят от физической природы переменных данного ряда.

2. Модели предметной области используют законы данной предметной области. В них используются математические, логические и вероятностные свойства, присущие конкретной предметной области. Среди моделей предметной области особо следует выделить системы, использующие агентное моделирование.

Ниже мы рассмотрим некоторые примеры реализации концепции цифровых двойников.

Цифровые двойники производственных процессов

Цифровые двойники могут отображать не только характеристики отдельных устройств, но и характеристики процессов. Современные производственные процессы весьма сложны и распределены в пространстве и во времени. Поэтому модели таких процессов должны учитывать распределенный характер объектов моделирования.

Рис. 2 отображает взаимодействие цифровой модели с объектом моделирования, представляющей производственный процесс. Взаимодействие происходит через средства интеграции, обеспечивающие сопряжение модели и объекта моделирования. Датчики, распределенные по всему производственному процессу, создают данные, характеризующие прохождение процесса в реальном мире.

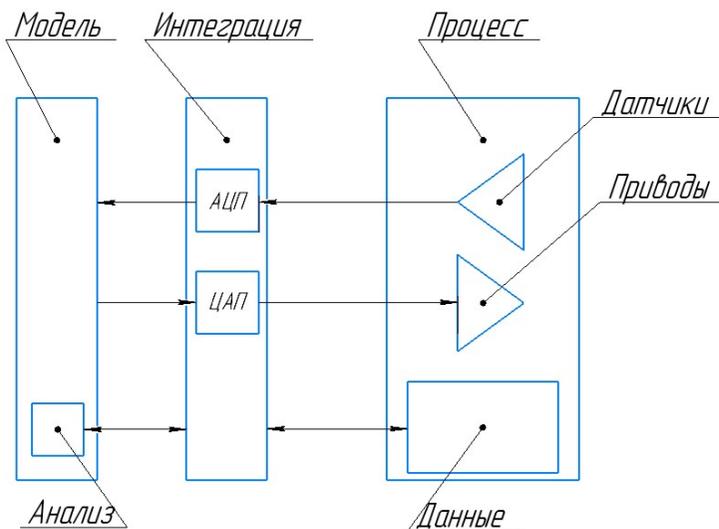


Рис. 2. Взаимодействие цифровой модели с процессом

Аналоговые сигналы от датчиков цифруются с помощью аналого-цифрового преобразователей, включенных в состав средств интеграции. Средства интеграции передают данные в цифровую модель, получают цифровые результаты моделирования и при необходимости преобразуют их в аналоговую форму для передачи исполнительным механизмам (приводам) производственного процесса. Средства моделирования включают анализ результатов моделирования и производственных данных. Результаты анализа обеспечивают своевременное внесение изменений в модель и при необходимости внесение изменений в производственный процесс. Приложение цифрового двойника постоянно анализирует входящие потоки данных. С течением времени анализ может выявить неприемлемые тенденции в фактических характеристиках производственного процесса в кон-

кретном измерении по сравнению с идеальным диапазоном допустимых характеристик. Такое сравнительное понимание может вызвать рассмотрение и возможное изменение некоторых аспектов производственного процесса в физическом мире [5].

Цифровая модель запаздывания видеотрафика

Этот цифровой двойник использует модель первого типа.

Чаще всего технологии потокового вещания используют адаптивную потоковую передачу данных, основанную на HTTP (англ. HAS). Потоковая передача видеотрафика является наиболее значимым сервисом при оказании операторами связи услуг Интернет-TV и YouTube [8, 9].

Имеется множество различных методов управления видеотрафиком. Как правило, все они основаны на буферизации принимаемого видеопотока перед его воспроизведением.

Принимаемые пакеты буферизируются в специальной буферной памяти, из которой непрерывно извлекаются и поступают на воспроизведение в реальном масштабе времени. Основная цель управления состоит в поддержании постоянным в буферной памяти некоторого объема пакетов, который обеспечивает непрерывное воспроизведение в течение заданного интервала времени.

Случайный характер изменения загрузки сети приводит к случайному процессу изменения задержек пакетов видеотрафика и необходимости управления размерами буфера на приемной стороне. Качество регулирования размеров буфера может быть повышено, если в системе управления постоянно учитывать указанные задержки и осуществлять их прогнозирование. Реализация процесса введения сигнала опережения поясняется на рис. 3. Для определения задержек трафика в сети в нее периодически поступают тестирующие пакеты от тестера (в качестве тестирующих могут быть использованы сигналы запроса пакетов). Пакеты, пройдя по сети до сервера и возвратившись обратно, обеспечивают определение круговых задержек сети.

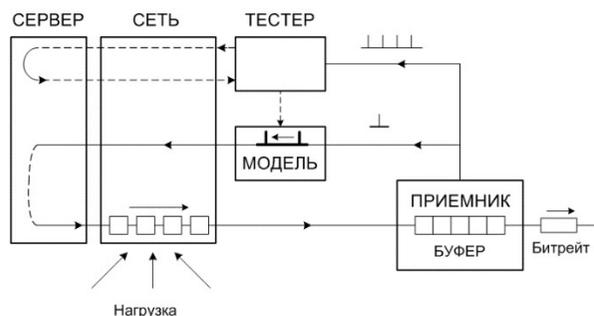


Рис. 3. Введение прогноза в цепь обратной связи

Получаемая информация обрабатывается, и в результате обработки формируется модель процесса запаздывания. На основании полученной модели производится прогнозирование запаздывания на расчетный момент подачи команды запроса очередного блока видеотрафика. Команда запроса подается с опережением (по отношению к расчетной) на величину спрогнозированного запаздывания. В качестве модели процесса изменения задержек в сети могут быть выбраны

вейвлеты или разностные интерполяционные формулы (например, формула Ньютона). Практика показала, что вполне можно ограничиться разностями третьего порядка.

Подзарядка аккумуляторов беспроводных сенсорных сетей (БСС)

Еще одним примером является процесс управления беспилотным летательным аппаратом при зарядке аккумуляторов (БСС). Техническое обслуживание и энергообеспечение элементов БСС представляют особые трудности для пространственно удаленных узлов сети. Эти элементы обычно питаются от автономных источников электроэнергии, нуждающихся в периодической подзарядке [12, 13].

Перспективной технологией подзарядки аккумуляторных батарей, позволяющей значительно увеличить срок службы элементов БСС, в настоящее время является способ подзарядки аккумуляторных батарей в сенсорных сетях при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [14]. Рассматриваемый способ основан на концепции цифровых двойников.

В качестве цифрового двойника здесь выступает показанная на рис. 4 цифровая модель беспроводной сети.

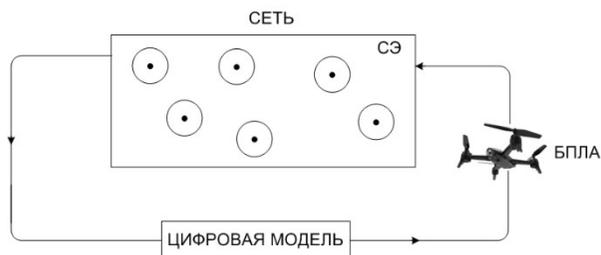


Рис. 4. Замена аккумуляторов сенсорных элементов БСС с помощью БПЛА

Рассмотрим процесс замены аккумуляторных батарей, реализующий этот способ. Имеется сеть сенсорных элементов (СЭ) с перезаряжаемыми аккумуляторными батареями. Аккумуляторы заменяются путем доставки и замены на стационарной станции сенсорных узлов с помощью БПЛА. Необходимо определить последовательность замены аккумуляторов с тем, чтобы в процессе замены ни один из аккумуляторов не успевал полностью разрядиться и при этом время, затраченное БПЛА в работе (коэффициент загрузки БПЛА), было минимальным.

На центральной базе всегда имеются готовые для замены СЭ с заряженными аккумуляторами. На центральной базе имеется поступающая по сети информация о степени зарядки аккумуляторов всех СЭ.

Перед началом полетов производится моделирование всего полного цикла обслуживания.

1. Текущие значения уровня заряда аккумуляторов располагаются в порядке их возрастания и выбирается элемент с минимальным значением.

2. Моделируется полное время полета и обслуживания указанного элемента, а его степень заряженности на модели устанавливается максимальной.

3. Моделируется процесс разрядки аккумуляторов всех остальных СЭ в течение времени полного полета (с возвратом) БПЛА и обслуживания сенсорного

устройства. Затем происходит переход к пункту 1, и процесс повторяется до окончания моделирования подзарядки аккумуляторов всех СЭ.

После окончания цикла моделирования выбирается СЭ с минимальным уровнем остаточного заряда и определяется остаточное время, в течение которого данный СЭ способен работать (все остальные элементы имеют большие остаточные времена). Если из времени прохождения полного цикла вычесть остаточное время, то получим гарантированное допустимое время ожидания полета с начала процесса моделирования. В течение указанного времени БПЛА может находиться на базе. Указанное время ожидания является гарантированным нижним пределом, поскольку при моделировании использовались максимально допустимые скорости разрядки аккумуляторов. БПЛА не производит полет и продолжает ожидать. После окончания промежутка времени ожидания в модель вновь поступают из сети все необходимые данные о состоянии СЭ и цикл моделирования повторяется. Так происходит итерационное повторение циклов моделирования до тех пор, пока разность результатов, полученных между соседними циклами, не достигнет установленного предела. После окончания моделирования становится известным номер СЭ, который требуется обслужить в первую очередь, и такой элемент обслуживается БПЛА.

После окончания обслуживания указанного СЭ процесс моделирования повторяется сначала и циклически обслуживаются все СЭ.

Высокая скорость цифрового моделирования позволяет произвести оптимизацию последовательности обслуживания сенсорных элементов СЭ с ее привязкой ко времени, обеспечивая минимизацию полетного времени и безусловное отсутствие полной разрядки аккумулятора любого из сенсорных элементов. При этом модель взаимодействует с моделируемой сетью, постоянно получая от нее актуальную информацию о состоянии, что свойственно цифровым двойникам.

Заключение

Цифровое моделирование является мощным орудием изучения свойств действующих или проектируемых объектов. Если процессы в действующей модели протекают быстрее, чем в реальном объекте, то, снабдив модель интерфейсными средствами, с помощью которых моделируемый объект взаимодействует с внешней средой, мы получаем цифровое устройство со свойствами, адекватными моделируемому объекту. Такая модель может быть встроена в реальную систему и называется цифровым двойником. Если быстродействие цифрового двойника выше, чем быстродействие моделируемого объекта, то появляется возможность прогнозирования протекающих в объекте процессов и использования результатов прогнозирования в системах автоматического управления этими процессами. Более расширенное понимание цифрового двойника вкладывается в среду моделирования производственных процессов. Указанная среда должна содержать помимо средств непосредственного моделирования также и средства анализа результатов воздействия на объект управления, реализующие обратную связь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тиханьчев О.В., Саятин О.В.* Оперативное прогнозирование развития обстановки как основа успешного управления применением войск (сил) // Военная мысль. 2015. № 4. С. 3–7.
2. *Новиков Д.А., Чхартушвили А.Г.* Активный прогноз. М.: ИПУ РАН, 2002. 101 с.

3. *Тиханычев О.В.* Прогнозирование при управлении динамическими системами // Программные продукты и системы. Т. 30. № 1. 2017. С. 40–44.
4. Википедия, Цифровой двойник [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифровой_двойник
5. *Гончаров А.С., Саклаков В.М.* Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии». 2018. С. 24–26.
6. *Reid J., Rhodes D.* Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs, Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
7. *Grieves M.* Origins of the Digital Twin Concept, Springer, Montreal (2016). Pp. 226–242. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.
8. *Akhshabi S., Anantakrishnan L., Dovrolis C., Begen Ali C.* What happens when HTTP adaptive streaming players compete for bandwidth. In Proc. ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV'12), Toronto, Ontario, Canada, 2012.
9. *Akhshabi S., Anantakrishnan L., Dovrolis C., Begen Ali C.* Server-based traffic shaping for stabilizing oscillating adaptive streaming players // In Proc. ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV'13), 2013.
10. *Боев В.Д.* Компьютерное моделирование. Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7. СПб.: ВАС, 2014. 432 с.
11. *Коровин А.М.* Моделирование систем: учебное пособие к лабораторным работам. Челябинск: ЮрГУ, 2010. 47 с.
12. *Scrosati B., Neat R.J.* Lithium polymer batteries, in: Applications of Electroactive Polymers, Springer, 1993. Pp. 182–222.
13. Nickel metal hydride battery. <http://www.batteryspace.com/nimhpacks24-48v.aspx>
14. *Лухтциндер Б.Я., Маслов О.Н.* Способ подзарядки аккумуляторов в беспроводной сенсорной сети. Описание изобретения по Патенту № 2730478 от 24.08.2020.

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2022 г.

MODELING AND DIGITAL TWIN

B.Ya. Lichtsinder, P.A. Olberg*

Volga State University Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstogo st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: lixt@psuti.ru, polinaolberg@gmail.com

Abstract. *This article considers various types of modeling and the concept of "digital double", as well as their examples of the concept of implementation. For example, computer simulations not only provide a prediction, but also identify which control effects on the system will lead to favorable developments between the link components of the model. In this case, digital simulation allows to optimize the service sequence of sensor elements SE with its time-bound, ensuring minimization of flight time and unconditional absence of complete battery discharge of any of the sensor elements. In this case, the model interacts with the network being modeled, constantly receiving from it up-to-date information about the state, which is characteristic of «digital duplicates». Digital doubles can display not only the characteristics of individual devices, but also process characteristics. Modern production processes are very complex and distributed in space and time. Models of such processes should therefore consider the distributed nature of the modelling objects. The interaction of the digital model with the model object representing the production process is also analyzed. The interaction takes place through integration tools that link the model with the model object.*

Keywords: *digital double, digital modeling, computer modeling, digital model, modelling environment, simulated network, control system, forecasting*

REFERENCES

1. *Tihannichev O.V., Sayapin O.V.* Operational forecasting of the development of the situation as the basis of successful management of the use of troops (forces) // Military thought. 2015. 4. Pp. 3–7.
2. *Novikov D.A., Chkhartishvili A.G.* Active prognosis. M.: Publishing House ISU RAS, 2002. 101 p.
3. *Tihannichev O.V.* Forecasting in the management of dynamic systems // Software products and systems. T. 30. 2017. Pp. 40–44.
4. Wikipedia, Digital Duplicate [Electronic Resource]. Access Mode: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST\\$double](https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST$double)
5. *Potcharov A.S., Saklakov V.M.* Digital Double: a review of existing solutions and prospects of technology development. elibrary.ru (2018). Article in the collection of works of the All-Russian scientific and practical conference.
6. *Reid J., Rhodes D.* Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs, Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
7. *Grieves M.* Origins of the Digital Twin Concept. Springer, Montreal (2016). Pp. 226–242. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.
8. *Akhshabi S., Anantakrishnan L., Dovrolis C., Begen Ali C.* What happens when HTTP adaptive streaming players compete for bandwidth. In Proc. ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV'12), Toronto, Ontario, Canada, 2012.

* *Boris Ya. Lichtsinder (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Polina A. Olberg, Student.*

9. *Akhshabi S., Anantakrishnan L., Dovrolis C., Begen Ali C.* Server-based traffic shaping for stabilizing oscillating adaptive streaming players. In Proc. ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV'13), 2013].
10. *Boev V.D.* Computer modeling: Handbook for practical training, coursework and diploma design in AnyLogic7. St. Petersburg: VAS, 2014. 432 p.
11. *Korovin A.M.* Systems Modeling: a textbook for laboratory work Chelyabinsk: Yurgu Publishing Center, 2010. 47 p.
12. *Skrosati B., Careful R.J.* Lithium Polymer Batteries, in: Applications of Electroactive Polymers, Springer, 1993. Pp. 182–222.
13. Nickel-metal hydride battery. <http://www.batteryspace.com/nimhpacks24-48v.aspx>
14. *Lichtsinder B.Ya., Maslov O.N.* A method of recharging batteries in a wireless sensor network. Description of the invention according to Patent No. 2730478 dated 08/24/2020.

УДК 681.5.013

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ НА ВЫХОДЕ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

*Д.С. Лысенко**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: dmitry-lusenko@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается опыт разработки адаптивной системы управления температурой сетевой воды на выходе котла-утилизатора. При разработке адаптивной системы управления решен ряд последовательных задач управления: создание нелинейной модели котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети, исследование частотных характеристик нейросетевой модели, идентификация структуры и параметров объекта управления, синтез типового регулятора, создание алгоритма адаптации параметров типового регулятора на базе аппарата нечеткой логики. В качестве объекта управления рассматривается котел-утилизатор водогрейный (КУВ). Объект управления представлен многомерной термодинамической системой с нелинейными характеристиками. Обучение и верификация нейросетевой модели проведены на данных, полученных в процессе эксплуатации котла. Идентификация структуры и параметров объекта управления осуществлена по данным частотной характеристики нейросетевой модели котла. Алгоритм адаптации параметров типового регулятора содержит наборы параметров типового регулятора для разных состояний объекта управления. В статье представлены: описание этапов синтеза адаптивной системы управления, результаты исследования нейросетевой модели в частотной области, результаты идентификации объекта управления, расчет параметров типового регулятора для разных состояний объекта управления, описание нечеткого алгоритма адаптации, результаты моделирования.

Ключевые слова: адаптивная система управления, структурная идентификация, параметрическая идентификация, частотные методы идентификации, искусственная нейронная сеть, нечеткая логика, котел-утилизатор водогрейный

Введение

Как объект управления котел-утилизатор водогрейный (КУВ) является многомерной термодинамической системой с нелинейными характеристиками. Численные методы создания моделей теплообменных аппаратов не всегда применимы из-за высокой вычислительной емкости [1, 2]. Модели сложных технологических процессов могут быть реализованы на базе аппарата нечеткой логики и нейросетевых технологий [3–5]. Результаты исследования [6, 7] посвящены синтезу адаптивных моделей котла-утилизатора КУВ на базе аппарата нечеткой логики и нейросетевых технологий. Однако синтез таких моделей не подразумевает создания традиционного математического описания

* Дмитрий Сергеевич Лысенко, аспирант кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

объекта, что накладывает ряд ограничений на применение их в задачах расчета параметров типового регулятора.

В настоящее время самым распространенным типом регулятора является ПИД-регулятор и его вариации П, ПИ, ПД [8, 9]. В работах [10, 11] приводится информация о системах управления котлоагрегата, реализованных на базе ПИД-регулятора. Относительно небольшое число степеней свободы, присущее линейному ПИД-регулятору, не позволяет получить переходный процесс нужного качества при управлении объектом с нелинейными характеристиками [12]. Нестационарность объекта управления без перенастройки коэффициентов ПИД-регулятора приводит к ухудшению качества управления, что выражается в увеличении энергопотребления и преждевременном износе установки [10].

Замкнутые системы управления, включающие ПИД-регулятор с алгоритмом адаптации, позволяют повысить качество управления. В отличие от алгоритмов [13, 14], в которых параметры регулятора настраиваются эмпирическим способом, алгоритмы адаптации [15, 16] имеют ясную структуру и поддаются обобщению. В основе таких алгоритмов лежит использование модели объекта управления для расчета или адаптации параметров регулятора. Идентификация математической модели имеет ключевую функцию в таких алгоритмах адаптации [17].

Эффективным методом идентификации технологических объектов является идентификация по частотным характеристикам [18]. Для идентификации частотными методами необходимо сформировать гармоническое испытательное воздействие на входе объекта. Как правило, такое воздействие нарушает нормальный режим работы технологической установки [19].

В работе предложено использовать нейросетевую модель котла-утилизатора для исследования характеристик объекта в частотной области и идентификации его структуры и параметров. Независимо от данного исследования схожую методологию идентификации разработали авторы работ [20, 21].

В области автоматического управления аппарат нечеткой логики и нейронные сети оказались подходящим средством для решения нелинейных задач управления, для которых обычные методы управления не дают удовлетворительных с практической точки зрения решений [12, 17]. В системах управления с ПИД-регуляторами аппарат нечеткой логики и нейронные сети нашли широкое применение. В работах [22, 23] представлен вариант гибридно-параллельной системы управления на базе нейронной сети и аппарата нечеткой логики. В работах [24, 25] нейронная сеть и нечеткая логика выступают как инструмент адаптации параметров ПИД-регулятора. В работах [26, 27] на базе аппарата нечеткой логики и нейросетевых технологий были созданы нелинейные аналоги ПИД-регулятора.

При разработке адаптивной системы управления температурой сетевой воды на выходе котла-утилизатора должны быть решены следующие задачи:

- 1) синтез динамической нейросетевой модели котла-утилизатора;
- 2) проведение активного эксперимента над динамической нейросетевой моделью и получение частотных характеристик нейросетевой модели КУВ;
- 3) идентификация структуры и параметров объекта управления по частотным характеристикам нейросетевой модели КУВ;
- 4) расчет параметров типового регулятора для разных состояний объекта управления;
- 5) синтез алгоритма адаптации параметров типового регулятора, учитывающего текущее состояние объекта управления.

В качестве управляемой величины рассматривается температура сетевой воды на выходе котла-утилизатора. Управляющее воздействие – расход сетевой воды через поверхности нагрева котла. Для регулирования и поддержания заданного значения температуры сетевой воды на выходе котла КУВ используется ПИ-регулятор. Аппарат нечеткой логики используется для реализации алгоритма адаптации параметров ПИ-регулятора.

Инструментом реализации были выбраны пакет прикладных программ MATLAB с библиотеками System Identification, Neural Network Toolbox, Fuzzy Toolbox и пакет моделирования динамических систем Simulink.

Описание объекта управления

Котлы-утилизаторы используют энергию отработанного газа после газотурбинных установок (ГТУ). Характерных для топливосжигающих котлоагрегатов горелок, систем подготовки и подачи топлива котлы-утилизаторы не имеют [28]. Котлы предназначены для подогрева сетевой воды, которая используется для обеспечения технологических процессов или отопления и горячего водоснабжения промышленных или жилых комплексов [29]. На рис. 1 представлена функциональная схема разрабатываемой системы автоматического управления температурой сетевой воды за котлом с указанием действующих на объект возмущений.

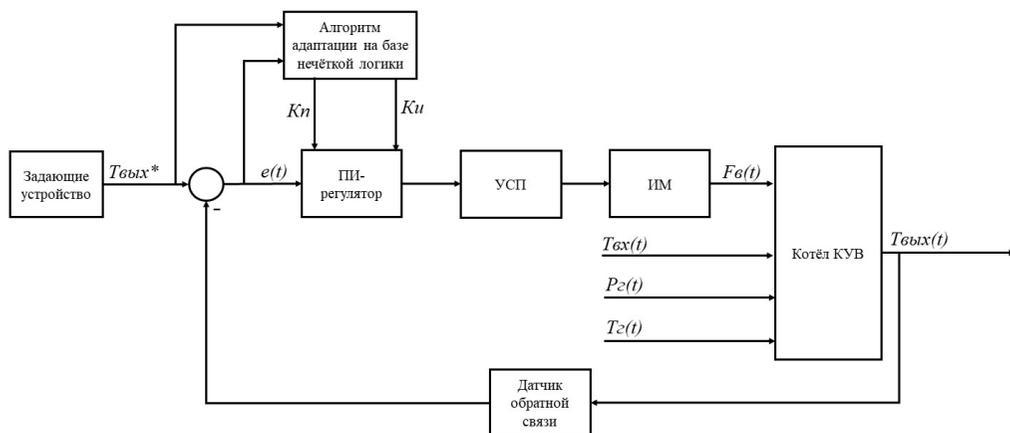


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления температурой сетевой воды на выходе котла-утилизатора: $T_{вых}(t)^*$ – заданное значение управляемой величины; $e(t)$ – ошибка управления; K_p , K_i – пропорциональный и интегральный коэффициент регулятора; УСП – управляемый силовой преобразователь; ИМ – исполнительный механизм; $F_{в}(t)$ – расход сетевой воды через поверхности нагрева (управляющее воздействие); $T_{вх}(t)$ – температура сетевой воды на входе в котел (возмущающее воздействие); $P_g(t)$ – давление газа на входе в котел (возмущающее воздействие); $T_g(t)$ – температура газа на входе в котел (возмущающее воздействие); $T_{вых}(t)$ – управляемая величина (температура сетевой воды за котлом)

Котел-утилизатор работает в нескольких режимах [7]: «Разгон ГТУ», «Номинальная нагрузка ГТУ», «Останов ГТУ». В динамических режимах «Разгон ГТУ» и «Останов ГТУ», когда параметры газа изменяются в широком диапазоне, автоматическое регулирование температуры сетевой воды за котлом

нецелесообразно. В режиме «Номинальная нагрузка ГТУ», когда параметры газа вышли на номинальные значения, необходимо осуществлять автоматическое регулирование температуры воды на выходе котла.

Адаптивная система управления температурой сетевой воды на выходе котла-утилизатора

Разработка адаптивной системы управления температурой сетевой воды на выходе из котла включает пять последовательных этапов.

1. Синтез нейросетевой модели. В работе [7] описан процесс синтеза нейросетевой модели котла-утилизатора. Выходной переменной нейросетевой модели выступает температура сетевой воды на выходе котла ($T_{\text{вых}}$). В качестве входных переменных используются: расход сетевой воды ($F_{\text{в}}$), температура сетевой воды на входе в котел ($T_{\text{вх}}$), давление отработанного газа на входе в котел (P_2), температура газа на входе в котел (T_2). Для обучения и верификации нейронной сети использовались архивные тренды, полученные в процессе эксплуатации котла-утилизатора. Нейросетевая модель котла-утилизатора построена на базе двухслойной рекуррентной нейронной сети и представляет собой дискретно-совпадающую модель с частотой дискретизации 1/60 Гц.

2. Активный вычислительный эксперимент над динамической нейросетевой моделью. В табл. 1 приводятся значения параметра ($T_{\text{вых}}$), которые были взяты в качестве рабочих точек при получении данных частотного отклика объекта. На входе ($F_{\text{в}}$) нейросетевой модели был сформирован сигнал синусоидальной формы на частотах ω , равных 0.01, 0.028, 0.083, 0.24, 0.69, 2.1 рад/такт. Значение амплитуды испытательного сигнала было выбрано 5 % от опорного значения. В табл. 1 приводятся результаты расчёта частотных характеристик нейросетевой модели котла-утилизатора, с указанием опорных значений испытательного сигнала ($F_{\text{в}}$). Параметры испытательного сигнала подобраны экспериментально. Испытательный сигнал позволяет получить тот объем данных частотной характеристики, который необходим для идентификации математической модели объекта управления.

Таблица 1

Результаты расчёта частотных характеристик нейросетевой модели котла-утилизатора

ω , рад/такт		0,01	0,028	0,083	0,24	0,69	2,1
$T_{\text{ВЫХ}} = 72 \text{ }^\circ\text{C};$ $F_{\text{В}} = 660 \text{ м}^3/\text{час}$	Re	-0,0202	-0,0202	-0,0205	-0,0223	-0,026	-0,0222
	Im	0,000039i	0,00011i	0,00036i	0,0018i	0,019i	0,0035i
$T_{\text{ВЫХ}} = 82 \text{ }^\circ\text{C};$ $F_{\text{В}} = 475 \text{ м}^3/\text{час}$	Re	-0,0989	-0,0986	-0,0968	-0,0831	-0,0178	-0,0245
	Im	0,0021i	0,0060i	0,0172i	0,0453i	0,0708i	0,0068i
$T_{\text{ВЫХ}} = 92 \text{ }^\circ\text{C};$ $F_{\text{В}} = 390 \text{ м}^3/\text{час}$	Re	-0,1249	-0,1246	-0,1216	-0,0994	-0,0114	-0,0234
	Im	0,0031i	0,0085i	0,0243i	0,0623i	0,0811i	0,0133i

Обозначения, принятые в табл. 1: ω – диапазон частот испытательного сигнала; Re – действительная часть комплексной частотной характеристики; Im – мнимая часть комплексной частотной характеристики. Единицы измерения ω задаются в рад/такт. Величина такта времени рассчитывается исходя из частоты дискретизации нейронной сети.

При проведении активного вычислительного эксперимента значение температуры воды на входе котла ($T_{\text{вх}}$) было равно 45 °С, давление ($P_{\text{г}}$) и температура газа ($T_{\text{г}}$) были равны 0,55 кПа и 500 °С. В результате активного вычислительного эксперимента была рассчитана комплексная частотная характеристика для каждого состояния объекта управления. При расчете комплексной частотной характеристики использовался алгоритм [30]. В табл. 1 приводятся результаты расчета частотных характеристик нейросетевой модели котла-утилизатора для разных значений $T_{\text{вых}}$.

3. Идентификация структуры и параметров объекта управления. Традиционным при синтезе систем автоматического управления является подход, при котором получают линеаризованную модель объекта управления в виде передаточной функции или модели пространства состояний [31, 32]. Данные комплексной частотной характеристики, полученной в результате активного вычислительного эксперимента над нейросетевой моделью, аппроксимировались передаточными функциями вида

$$W(p) = \frac{b_0}{a_1 p + a_0}, \quad (1)$$

$$W(p) = \frac{b_0 e^{-p\tau}}{a_1 p + a_0}, \quad (2)$$

$$W(p) = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (3)$$

В качестве инструмента идентификации использовалась библиотека System Identification пакета прикладных программ MATLAB. В качестве алгоритма оптимизации и поиска параметров математической модели был выбран метод последовательного квадратичного программирования.

В табл. 2 приводится оценка схожести (L) частотных характеристик нейросетевой модели и структур математических моделей (1) – (3). При оценке схожести (L) сравнивались частотные характеристики нейросетевой модели и моделей (1) – (3) в диапазоне частот ω от 0,01 до 2,1 рад/такт. Схожесть (L) рассчитывается по нормализованной среднеквадратичной ошибке (NRMSE) и показывает процент совпадения между частотными характеристиками нейросетевой модели и моделями (1) – (3). При расчете (L) использовалась стандартная функция библиотеки System Identification [33]. По наибольшему значению (L) была выбрана модель (3).

Таблица 2

**Сравнение частотных характеристик нейросетевой модели
и моделей (1)-(3)**

$T_{\text{вых}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$L(1), \%$	$L(2), \%$	$L(3), \%$
72	44,8	35,9	82,9
82	87,4	53,7	98,2
92	90,7	58,1	97,1

При $T_{\text{вых}} = 72 \text{ } ^\circ\text{C}$ объект управления может быть представлен колебательным звеном

$$W_{\text{oy}}(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}.$$

При $T_{\text{вых}} = 82, 92 \text{ } ^\circ\text{C}$ объект управления может быть представлен последовательным соединением двух апериодических звеньев 1-го порядка

$$W_{\text{oy}}(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}.$$

В табл. 3 приводятся параметры объекта управления (канал «Расход сетевой воды через поверхности нагрева» – «Температура сетевой воды на выходе котла-утилизатора»).

Таблица 3

Результат идентификации параметров моделей объекта управления

$T_{\text{вых}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$k, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T, \text{ такт}$	ξ	$T_1, \text{ такт}$	$T_2, \text{ такт}$
72	-0,22	0,6	0,23	–	–
82	-0,098	–	1,09	1,11	0,45
92	-0,12	–	1,36	1,77	0,15

4. Расчет замкнутой системы управления с изменяющейся полосой пропускания. Полоса пропускания является важной характеристикой системы. Чем шире полоса пропускания, тем быстрее замкнутая система управления отработает координатное возмущение. Координатное возмущения обусловлено значительно более быстрыми процессами, чем параметрическое возмущение. Поэтому спектральный состав параметрического возмущения принимается существенно более низкочастотным по сравнению с координатным. При наличии на объекте параметрического возмущения, связанного с изменением внутренних параметров, замкнутая система с широкой полосой пропускания будет работать неэффективно или периодически будет терять устойчивость [34]. В работе предложено компенсировать воздействие параметрического возмущения через уменьшение верхней границы полосы пропускания замкнутой системы управления.

Для каждого значения рабочей точки ($T_{\text{вых}}$) были рассчитаны два набора параметров ПИ-регулятора. Каждый набор параметров регулятора соответствует замкнутой системе с разным диапазоном частот полосы пропускания. Верхняя граница полосы пропускания ω_1, ω_2 для каждой рабочей точки подобрана экспериментально по результатам анализа ЛАЧХ замкнутой системы управления. Нижние границы полосы пропускания приняты равными нулю. В табл. 4 приведены результаты расчета параметров типового регулятора с указанием верхней границы частоты полосы пропускания (ω_1, ω_2).

Для расчета параметров регулятора использовалась функция PIDTUNE пакета прикладных программ MATLAB. Апробация разрабатываемых методик настройки параметров регулятора проводилась на нейросетевой модели КУВ. Нейросетевая модель является дискретной моделью, в связи с чем форма реализации регулятора – дискретный ПИ-регулятор. Принцип действия – регулятор обратного действия.

Результаты расчёта параметров типового регулятора

$T_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	72		82		92	
$\omega_1, \text{рад./такт}$	0,21		0,43		0,55	
$K_{\text{п}}$	4,72	Набор параметров № 1	3,79	Набор параметров № 2	7,1	Набор параметров № 3
$K_{\text{и}}$	9,44		4,95		5,95	
$\omega_2, \text{рад./такт}$	0,084		0,11		0,12	
$K_{\text{п}}$	1,89	Набор параметров № 4	0,57	Набор параметров № 5	0,52	Набор параметров № 6
$K_{\text{и}}$	3,78		1,14		1,04	

5. Синтез алгоритма адаптации параметров типового регулятора на базе нечеткой логики. В качестве входных переменных нечеткого алгоритма адаптации параметров типового регулятора были выбраны: заданное значение ($T_{\text{вых}}^*$) и ошибка управления $e(t)$. Выходные переменные нечеткого алгоритма адаптации: пропорциональный коэффициент ($K_{\text{п}}$) и интегральный коэффициент ($K_{\text{и}}$) регулятора. Была осуществлена фаззификация входных и выходных лингвистических переменных. Входная лингвистическая переменная ($T_{\text{вых}}^*$) имеет три терма: диапазон изменения № 1 (Tz_1), диапазон изменения № 2 (Tz_2), диапазон изменения № 3 (Tz_3). В качестве функций принадлежности для всех термов лингвистической переменной была выбрана треугольная функция принадлежности

$$\mu_i(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{при } a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{при } b \leq x \leq c; \\ 0, & \text{при } c \leq x. \end{cases} \quad (4)$$

Входная лингвистическая переменная $e(t)$ имеет три терма: большое отрицательное (NL), нормальное (N) и большое положительное (PL). Для терма (NL) была выбрана Z-подобная функция принадлежности

$$\mu_z(x, a, b) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \leq a; \\ 1 - 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & \text{при } a < x \leq \frac{a+b}{2}; \\ 2 \left(\frac{b-x}{b-a} \right)^2, & \text{при } \frac{a+b}{2} < x \leq b; \\ 0, & \text{при } b \leq x, \end{cases} \quad (5)$$

для терма (N) была выбрана треугольная функция принадлежности, для терма (PL) была выбрана S-подобная функция принадлежности

$$\mu_s(x, a, b) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq a; \\ 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & \text{при } a < x \leq \frac{a+b}{2}; \\ 1 - 2 \left(\frac{b-x}{b-a} \right)^2, & \text{при } \frac{a+b}{2} < x \leq b; \\ 1, & \text{при } b \leq x. \end{cases} \quad (6)$$

Выбор функций параметров $e(t)$ осуществлялся с учетом рекомендаций [6, 35].

В табл. 5 представлены конечные параметры функций принадлежности. Параметры функции (4) записаны в последовательности $[a, b, c]$, параметры функций (5), (6) записаны в последовательности $[a, b]$.

Таблица 5

Координаты функций принадлежности алгоритма адаптации параметров типового регулятора

Название входа	Диапазон изменения	Координаты функций принадлежности		
		(Tz_1)	(Tz_2)	(Tz_3)
Заданное значение ($T_{\text{вых}}$)	72 ÷ 92 °С	$[72.0, 77.0, 82.0]$	$[77.0, 82.0, 88.0]$	$[82.0, 87.0, 92.0]$
		(NL)	(N)	(PL)
Ошибка управления $e(t)$	-25 ÷ +25 °С	$[-25.0, 0]$	$[-5.0, 0, 5.0]$	$[0, 25.0]$

В качестве алгоритма нечеткого вывода был выбран алгоритм Сугено [12]. Константы базы правил приводятся в табл. 4. Правила базы имеют следующий вид:

$$R_1: \text{Если } (T_{\text{вых}}^* = Tz_1) \wedge (e(t) = NL), \text{ то } K_{\text{п}} = 4,72 \wedge K_{\text{и}} = 9,44;$$

$$R_2: \text{Если } (T_{\text{вых}}^* = Tz_1) \wedge (e(t) = N), \text{ то } K_{\text{п}} = 1,89 \wedge K_{\text{и}} = 3,78;$$

...

$$R_9: \text{Если } (T_{\text{вых}}^* = Tz_3) \wedge (e(t) = PL), \text{ то } K_{\text{п}} = 0,52 \wedge K_{\text{и}} = 1,04.$$

Количество правил определяется произведением количества лингвистических термов всех входных переменных. Это обеспечивает полноту базы правил. В табл. 6 представлена база правил нечеткого алгоритма адаптации параметров типового регулятора.

Таблица 6

База правил алгоритма адаптации параметров типового регулятора

$e(t)$	Tz_1	Tz_2	Tz_3, Tz_3
NL	Набор параметров № 1	Набор параметров № 2	Набор параметров № 3
N	Набор параметров № 4	Набор параметров № 5	Набор параметров № 6
PL	Набор параметров № 1	Набор параметров № 2	Набор параметров № 3

Вычислительный эксперимент

В результате выполнения всех этапов разработки адаптивной системы управления была разработана замкнутая система управления температурой сетевой воды на выходе котла КУВ. Замкнутая система управления представлена ПИ-регулятором с алгоритмом адаптации параметров на базе нечеткой логики. В качестве модели объекта управления использовалась нейросетевая модель котла-утилизатора. В качестве величины задания ($T_{\text{вых}}^*$) использовались равномерно распределенные случайные значения в диапазоне от 72 до 92 °С. Интервал изменения задания – 200 тактов. На рис. 2 приводится структура Simulink-модели, реализующей разработанную систему управления в пакете моделирования динамических систем Simulink пакета прикладных программ MATLAB.

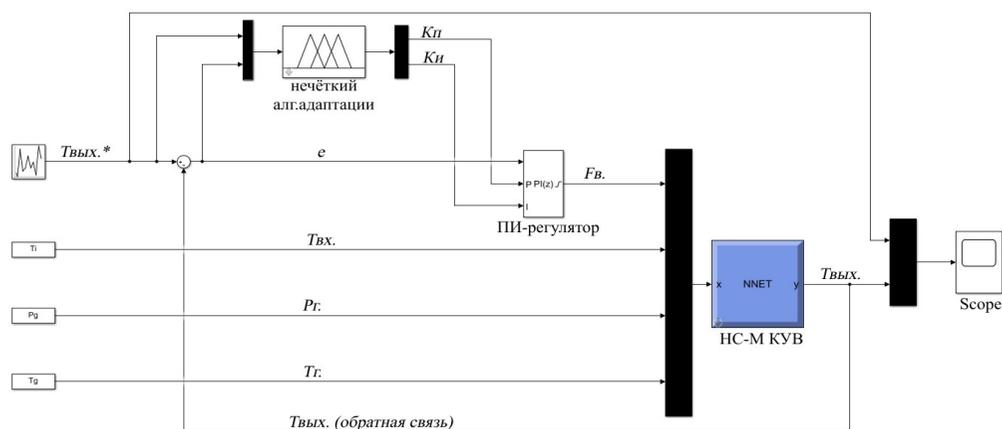


Рис. 2. Simulink-модель контура автоматического регулирования температуры сетевой воды на выходе котла КУВ: $T_{\text{вых}}^*$ – заданное значение управляемой величины; e – ошибка управления; $F_{\text{в}}$ – расход сетевой воды через поверхности нагрева (управляющее воздействие); $T_{\text{вх}}$ – температура воды на входе в котел; $P_{\text{г}}$ – давление газа на входе в котел; $T_{\text{г}}$ – температура газа на входе в котел; $T_{\text{вых}}$ – управляемая величина

При проведении вычислительного эксперимента на входы нейросетевой модели ($T_{\text{вх}}$), ($P_{\text{г}}$), ($T_{\text{г}}$) были поданы реальные значения переменных, снятые при эксплуатации котла в режиме «Номинальная нагрузка ГТУ». На рис. 3 приводятся данные об изменении переменных $T_{\text{вх}}$, $P_{\text{г}}$, $T_{\text{г}}$, которые были использованы при проведении активного вычислительного эксперимента.

На рис. 4 приводятся результаты моделирования замкнутых систем управления с ПИ-регулятором без алгоритма адаптации (ПИ-рег. без АА) и с ПИ-регулятором с алгоритмом адаптации (ПИ-рег. с АА). ПИ-регулятор без алгоритма адаптации имел параметры $K_{\text{п}} = 4.72$, $K_{\text{и}} = 9.44$ (набор параметров № 1, запас устойчивости по фазе $\varphi = 87^\circ$, максимальный запас устойчивости может быть задан $\varphi = 90^\circ$). Исходя из кривых переходного процесса в некоторых случаях при изменении ($T_{\text{вых}}^*$) в замкнутом контуре с ПИ-регулятором без алгоритма адаптации наблюдается перерегулирование и небольшой колебательный процесс. В замкнутом контуре управления с ПИ-регулятором

и алгоритмом адаптации при изменении задания перерегулирование отсутствует, регулятор обрабатывает задание без потери качества управления. В отличие от регулятора с алгоритмом адаптации ПИ-регулятор без алгоритма адаптации более чувствителен к изменению переменных $T_{вх}$, $P_{г}$, $T_{г}$.

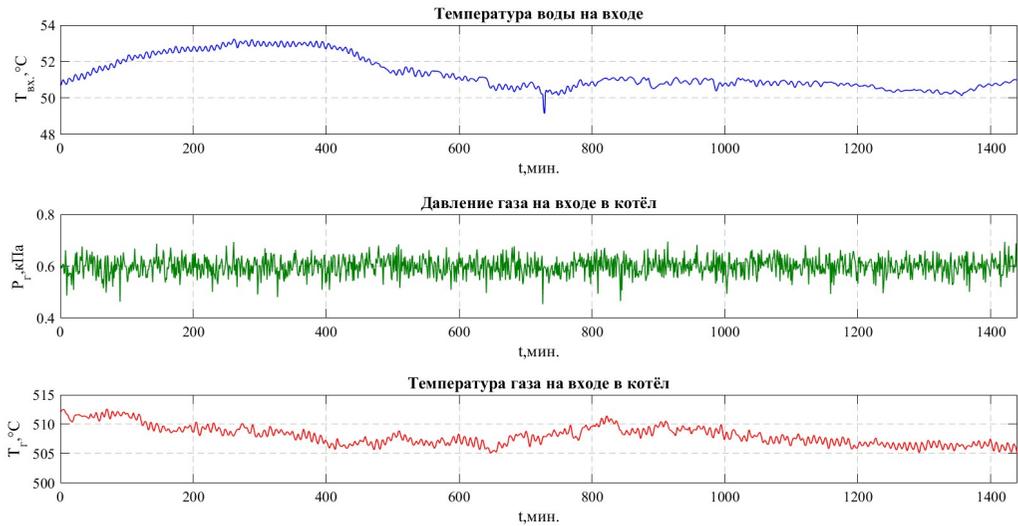


Рис. 3. Данные об изменении переменных $T_{вх}$, $P_{г}$, $T_{г}$ при эксплуатации котла-утилизатора КУВ в режиме «Номинальная нагрузка ГТУ»

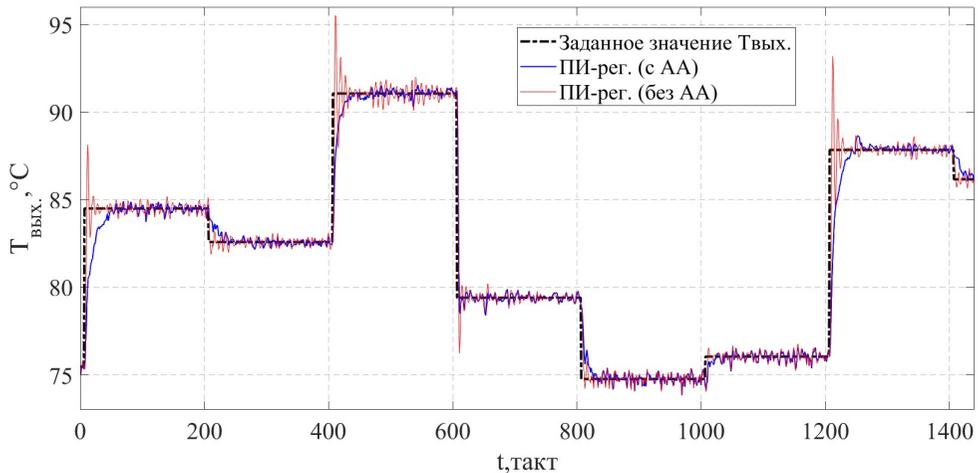


Рис. 4. Результат моделирования замкнутой системы управления при изменении заданного значения ($T_{вых}^*$)

Заключение

На основе синергии традиционных методов теории управления с аппаратом нечеткой логики и нейронных сетей была решена задача управления котлом-утилизатором. В работе была предложена методика идентификации аппроксимирующей передаточной функции (структура и параметры) объекта управления частотными методами без прямого воздействия на установку.

Активный вычислительный эксперимент по получению частотных характеристик был реализован на нейросетевой модели установки. Разработан алгоритм настройки параметров типового регулятора на базе аппарата нечеткой логики. В основе алгоритма лежит принцип взаимосвязи коэффициентов регулятора с граничным значением полосы пропускания замкнутой системы управления. Реализованный алгоритм настройки коэффициентов регулятора имеет ясную структуру и принципы функционирования. По мнению автора, разработанные подходы имеют следующие положительные стороны и ограничения.

Положительные стороны:

1. На базе нейросетевых технологий может быть создана динамическая модель теплообменного аппарата с нелинейными характеристиками в условиях отсутствия полной информации об объекте моделирования. Наблюдаемыми могут быть только входы и выходы системы. При этом результаты апробации нейросетевой модели на реальных данных показали приемлемую точность модели [7].

2. Предложенная методика идентификации объекта частотными методами позволяет провести активный эксперимент на модели взамен воздействия на реальную технологическую установку. Схожая методика идентификации была апробирована в сторонних исследованиях, на схожих объектах [20, 21].

3. Предложен алгоритм адаптации параметров типового регулятора, который позволяет учитывать нелинейные свойства объекта управления. Синтез схожих по принципу реализации алгоритмов адаптации параметров типового регулятора на базе нечеткой логики приводится в работах [9, 35]. Однако в предложенных авторами алгоритмах настройка коэффициентов регулятора осуществляется на основе эмпирических знаний. В данной работе принцип настройки коэффициентов регулятора и границы их изменения были привязаны к полосе пропускания замкнутой системы управления и определены более четко.

Ограничения:

1. Для синтеза нейросетевой модели необходимы данные для ее обучения. Без данных синтез нейросетевой модели невозможен; соответственно, реализация последующих этапов также невозможна.

2. При выборе рабочих точек для расчета частотных характеристик и проведения вычислительного эксперимента рекомендуется соблюдать ограничение: диапазоны изменения активного воздействия и отклика нейросетевой модели должны укладываться в диапазоны изменения этих параметров в обучающей выборке. В связи с этим при проведении вычислительного эксперимента заданное значение ($T_{вых}^*$) было ограничено диапазоном от 72 до 92 °С – соответствовало диапазону изменения параметра ($T_{вых}$) в режиме «Номинальная нагрузка ГТУ».

3. В существующей реализации алгоритма адаптации параметров типового регулятора отсутствует функция аналитического расчёта оптимального диапазона полосы пропускания замкнутой системы управления. Результаты расчёта диапазонов полосы пропускания в алгоритме адаптации параметров типового регулятора носят экспериментальный характер и не содержат общих рекомендаций по реализации предложенного алгоритма на других объектах управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимов А.Г. Синтез нейросетевых структур для моделирования управляемых объектов с распределенными параметрами: Автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.13.01. М.: Московский инженерно-физический институт, 2008. 26 с.
2. Данилушкин И.А. Численно-аналитическая модель теплообмена для потока с переменной скоростью // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI международной конференции. Т. 1. Самара: Офорт, 2019. С. 262–265.
3. Кузнецов А.В., Макарьянц Г.М. Разработка нейросетевой модели малоразмерного газотурбинного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 131–144.
4. Дорофеев Е.А., Игнатъев Д.И., Храбров А.Н. Применение искусственных нейронных сетей для моделирования нестационарных аэродинамических характеристик // Аэрокосмические исследования, прикладная механика. Труды МФТИ, 2011. Т. 3, № 3. С. 64–72.
5. Головкин Н.А., О.С. Логунова. Оценка архитектуры искусственных нейронных сетей для моделирования процессов нагрева стальной полосы на агрегате непрерывного горячего цинкования // Вестник НТУ «ХПИ». 2012. № 62 (968). С. 33–39.
6. Лысенко Д.С., Данилушкин И.А. Разработка модели котла-утилизатора на базе аппарата нечеткой логики // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI международной конференции. Т. 2. Самара: Офорт, 2019. С. 268–271.
7. Лысенко Д.С., Данилушкин И.А. Динамическая модель котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2020. Вып. 2 (65). С. 59–72.
8. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 460 p.
9. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1. С. 78–88.
10. Кулаков Г.Т., Горельшьева М.Л. Исследование влияния качества регулирования температуры перегретого пара на срок службы металла пароперегревателя котлов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика: научно-технический и производственный журнал. 2009. № 4. С. 62–69.
11. Куцый Н.Н., Лукьянов Н.Д. Синтез системы управления многосвязным объектом с помощью генетического алгоритма на примере прямоточного котла // Научный вестник НГТУ. 2014. Т. 55, № 2. С. 36–42.
12. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 798 с.
13. Вадутов О.С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера – Николса: учеб.-метод. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 10 с.
14. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME. 1952. Vol. 74. Pp. 175–185.
15. Бажанов В.Л., Кузьмин А.В., Кузьмин Н.В. Настройка ПИД-регуляторов с помощью метода масштабирования на объектах управления с запаздыванием и на объектах высокого порядка // Автоматизация в промышленности. 2009. № 2. С. 15–20.
16. Барабанов А.Е. Применение метода наименьших квадратов для построения адаптивного оптимального управления линейным динамическим объектом // Автомат. и телемех., 1983. Вып. 12. С. 57–65.
17. Омату С., Халид М., Юсуф Р. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2. Пер. Н.В. Батина. Под. ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. ИПРЖР. 2000. 272 с. (Нейрокомпьютеры и их применение).
18. Пьявченко Т.А. Метод идентификации промышленного объекта по его временной и частотной характеристикам // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 7. С. 216–219.
19. Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов. Автомат. и телемех. Вып. 2, 2014. С. 16–30.
20. Шумихин А.Г., Бояришинова А.С. Применение нейросетевых динамических моделей в задачах параметрической идентификации технологического объекта в составе системы управления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического

- университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 3. С. 21–37.
21. *Шумихин А.Г., Александрова А.С., Мустафин А.И.* Параметрическая идентификация технологического объекта в режиме его эксплуатации с применением технологии нейронных сетей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 26. С. 29–41.
 22. *Будько М.Б., Будько М.Ю., Гирик А.В., Грозов В.А.* Система управления мультироторным беспилотным летательным аппаратом на основе гибридного нейрорегулятора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 209–215.
 23. *Игнатьев В.В., Спиридонов О.Б., Курейчик В.М., Ковалёв А.В., Игнатьев А.С.* Методы гибридного управления в интеллектуальных системах на основе ПИД и ПИД-Fuzzy регуляторов // Вестник РГРТУ. 2017. № 62. С. 110–118.
 24. *Еременко Ю.И., Полеценко Д.А., Глуценко А.И., Фомин А.В.* Об оценке применимости различных структур нейронной сети в реализации нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления тепловыми объектами // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 3.2 (57). С. 236–241.
 25. *Голосовский М.С., Богомолов А.В., Теремов Д.С., Евтушенко Е.В.* Алгоритм настройки системы нечеткого логического вывода типа Мамдани // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Математика, физика, механика. 2018. Т. 10, № 3. С. 110–118.
 26. *Burakov M.V., Kurbanov V.G.* Neuro-PID Control for Nonlinear Plants with Variable Parameters // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017. Vol. 12, no. 4. Pp. 1226–1229.
 27. *Муравьёва Е.А., Юрасов А.О.* Применение нейронных сетей, имитирующих ПИД-регулятор для управления деаэратором // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. № 2. Т. 16. С. 59–65.
 28. *Липов Ю.М., Третьяков Ю.М.* Котельные установки и парогенераторы. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 592 с.
 29. *Зыков А.К.* Паровые и водогрейные котлы. М.: Энергоатомиздат, 1987. 128 с.
 30. *Laub A.J.* Efficient Multivariable Frequency Response Computations // IEEE[®] Transactions on Automatic Control, AC-26. 1981. Pp. 407–408.
 31. Теплогидравлические модели оборудования электрических станций / Под общ. ред. Г.А. Филипова, Ф.Ф. Пашенко. М.: Физматлит, 2013. 448 с.
 32. *Ковалёв Д.А., Шаряков В.А., Шарякова О.Л.* Теория автоматического управления: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2020. 79 с.
 33. Сайт компании MathWorks (MATLAB) [Электронный ресурс]: URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/compare.html> (Дата обращения 03.09.22).
 34. *Khobin V.A., Levinskyi M.V.* Own motion filters optimization for self-tuning ACS with the technological type of control object // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2016. № 4. Pp. 120–129.
 35. *Бураков М.В., Коновалов А.С.* Нечеткий супервизор ПИД-регулятора. Информационно-управляющие системы. 2018. № 5. С. 13–21. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2022 г.

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR THE WATER TEMPERATURE AT THE OUTLET OF THE WASTE BOILER

D.S. Lysenko *

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: dmitry-lusenko@yandex.ru

Abstract. *The experience of developing an adaptive system for controlling the temperature of network water at the outlet of a waste heat boiler is considered. When developing an adaptive control system, a number of sequential control problems were solved: creating a nonlinear model of a waste heat boiler based on a recurrent neural network, studying the frequency characteristics of a neural network model, identification structure and parameters of a control object, synthesizing a typical controller, creating an algorithm for adapting the parameters of a typical controller based on a fuzzy logic. A waste heat boiler is considered as a control object. The control object is represented by a multidimensional thermodynamic system with non-linear characteristics. Training and verification of the neural network model was carried out on the data obtained during the operation of the boiler. Identification of the structure and parameters of the control object is carried out according to the frequency response of the neural network model of the boiler. The algorithm for adapting the parameters of a typical controller contains sets of parameters of a typical controller for different states of the system with different bandwidths. The article presents a description of the stages of synthesis of an adaptive control system, the results of studying a neural network model in the frequency domain, the results of identifying a control object, calculating the parameters of a typical controller for different system states, describing a fuzzy adaptation algorithm, and modeling results.*

Keywords: *adaptive control system, structural identification, parametric identification, frequency identification methods, artificial neural network, fuzzy logic, waste heat boiler*

REFERENCES

1. *Trofimov A.G.* Synthesis of neural network structures for modeling controlled objects with distributed parameters // abstract of the thesis of a candidate of technical sciences: 05.13.01. M.: Moscow Engineering Physics Institute, 2008. 26 p.
2. *Danilushkin I.A.* Numerical-analytical model of heat transfers for a flow with a variable speed // Problems of control and modeling in complex systems: Proceedings of the XXI international conference. T. 1. Samara: Etching, 2019. Pp. 262–265.
3. *Kuznetsov A.V., Makaryants G.M.* Development of a neural network model of a small-sized gas turbine engine // Bulletin of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University). 2016. V. 15, No. 2. Pp. 131–144.
4. *Dorofeev E.A., Ignatiev D.I., Khrabrov A.N.* The use of artificial neural networks for modeling non-stationary aerodynamic characteristics // Aerospace research, applied mechanics Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology – 2011. Vol. 3, No. 3. Pp. 64–72.
5. *Golovko N.A., Logunov O.S.* Evaluation of the architecture of artificial neural networks for modeling the heating processes of a steel strip on a continuous hot dip galvanizing unit // Bulletin of NTU “KhPI”, 2012. No. 62 (968). Pp. 33–39.
6. *Lysenko D.S., Danilushkin I.A.* Development of a waste heat boiler model based on the apparatus of fuzzy logic // Problems of control and modeling in complex systems: Proceedings of the XXI international conference. T. 2. Samara: Etching, 2019. C. 268–271.

* *Dmitrij S. Lysenko, Postgraduate Student.*

7. *Lysenko D.S., Danilushkin I.A.* Dynamic model of a waste-heat boiler based on a recurrent neural network // Bulletin of the Samara State Technical University. Ser. Technical science. 2020. Issue 2 (65). Pp. 59–72.
8. *Astrom K.J., Hagglund T.* Advanced PID control ISA. The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 460 p.
9. *Denisenko V.* PID controllers: principles of construction and modification. Part 1 // Modern automation technologies. 2007. No. 1. Pp. 78–88.
10. *Kulakov G.T., Gorelysheva M.L.* Study of the influence of the quality of superheated steam temperature control on the service life of the metal of the boiler superheater // News of higher educational institutions and energy associations of the CIS // Energy: scientific and technical and production magazine. 2009. No. 4. Pp. 62–69.
11. *Kutsiy N.N., Lukyanov N.D.* Synthesis of a control system for a multiply connected object using a genetic algorithm on the example of a once-through boiler // Scientific Bulletin of NSTU. 2014. V. 55, No. 2. Pp. 36–42.
12. *Pegat A.* Fuzzy modeling and control. M.: BINOM. Knowledge Laboratory, 2015. 798 p.
13. *Vadutov O.S.* Tuning typical regulators according to the Ziegler-Nichols method: a teaching aid. Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2014. 10 p.
14. *Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B.* On automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME. 1952. Vol. 74. Pp. 175–185.
15. *Bazhanov V.L., Kuzmin A.V., Kuzmin N.V.* Tuning PID controllers using the scaling method on control objects with delay and on high-order objects // Automation in Industry. 2009. No. 2. Pp. 15–20.
16. *Barabanov A.E.* Application of the least squares method for constructing an adaptive optimal control of a linear dynamic plant // Avtomat. i telemekh. 1983. № 12. Pp. 57–65.
17. *Omatu S., Khalid M., Yusuf R.* Neurofeedback and its applications. Book 2. Per. N.V. Batina. Ed. A.I. Galushkina, V.A. Ptichkin. IPRZHR. 2000. 272 p.
18. *Piavchenko T.A.* Method for identifying an industrial facility by its time and frequency characteristics // Izvestia SFU. Technical science. 2010. No. 7. Pp. 216–219.
19. *Aleksandrov A.G., Palenov M.V.* State and development prospects of adaptive PID controllers // Avtomat. i telemekh. 2014, № 2, Pp. 16–30.
20. *Shumikhin A.G., Boyarshinova A.S.* Application of neural network dynamic models in the problems of parametric identification of a technological object as part of a control system // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2015. No. 3. Pp. 21–37.
21. *Shumikhin A.G., Aleksandrova A.S., Mustafin A.I.* Parametric identification of a technological object in the mode of its operation using the technology of neural networks // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2018. No. 26. Pp. 29–41.
22. *Budko M.B., Budko M.Yu., Girik A.V., Grozov V.A.* Control system for a multirotor unmanned aerial vehicle based on a hybrid neuroregulator // Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics. 2019. V. 19. No. 2. Pp. 209–215.
23. *Ignatiev V.V., Spiridonov O.B., Kureichik V.M., Ignatiev A.V.* Methods of hybrid control in intelligent systems based on PID and PID-Fuzzy controllers // Vestnik RGRTU. 2017, No. 62. Pp. 110–118.
24. *Eremenko Y.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I., Fomin A.V.* On assessing the applicability of various structures of a neural network in the implementation of a neural network optimizer of PI controller parameters for controlling thermal objects // Control Systems and Information Technologies, No. 3.2 (57), 2014. Pp. 236–241.
25. *Golosovsky M.S., Bogomolov A.V., Terebov D.S., Yevtushenko E.V.* Algorithm for setting up a Mamdani-type fuzzy inference system // Bulletin of SUSU. Series: Mathematics, Physics, Mechanics. 2018. V. 10, No. 3. Pp. 110–118.
26. *Burakov M.V., Kurbanov V.G.* Neuro-PID Control for Nonlinear Plants with Variable Parameters // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017. Vol. 12, № 4. Pp. 1226–1229.
27. *Muravyova E.A., Yurasov A.O.* Application of neural networks simulating a PID controller to control a deaerator // Electrotechnical and information complexes and systems. 2020. No. 2, V.16. Pp. 59–65.
28. *Lipov Y.M., Tretyakov Y.M.* Boiler plants and steam generators. M.: Regular and chaotic dynamics, 2005. 592 p.
29. *Zykov A.K.* Steam and hot water boilers. M.: Energoatomizdat, 1987. 128 p.

30. *Laub A.J.* Efficient Multivariable Frequency Response Computations // IEEE® Transactions on Automatic Control, AC-26 (1981). Pp. 407–408.
31. Thermal-hydraulic models of power station equipment / Under the general. Ed. by *G.A. Filipova, F.F. Pashchenko*. M.: FIZMATLIT, 2013. 448 p.
32. *Kovalev D.A., Sharyakov V.A., Sharyakova O.L.* Theory of automatic control: textbook / Higher School of Economics SPbGUPTD. St. Petersburg, 2020. 79 p.
33. Website of the company MathWorks (MATLAB) [Electronic resource]: URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/compare.html> (Accessed 09.03.22).
34. *Khobin V.A., Levinskyi M.V.* Own motion filters optimization for self-tuning ACS with the technological type of control object // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2016. № 4. Pp. 120–129.
35. *Burakov M.V., Kononov A.S.* Fuzzy supervisor for PID controller. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* // Information and Control Systems, 2018, no. 5. Pp. 13–21. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.

УДК 004.942

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ НА СЕТЯХ ПЕТРИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.П. Орлов, С.В. Сусарев*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: orlovsp1946@gmail.com

***Аннотация.** Обзор посвящен анализу подходов и методов применения имитационных моделей при организации технического обслуживания и ремонта сложных технических объектов и систем. Развитие концепции «Индустрия 4.0» и Интернета вещей предполагает переход от периодического и профилактического технического обслуживания к прогнозному обслуживанию на основе исследования процессов при эксплуатации объектов. В статье показано, что системные модели на сетях Петри удобны для описания и анализа технологических процессов и обслуживания оборудования. Виртуальные испытания и виртуальный ввод в эксплуатацию являются одним из этапов проектирования и производства технических объектов повышенной сложности. В связи с этим актуально создание имитационных моделей в составе цифровых двойников агрегатов и узлов для исследования технических состояний. Проведенный анализ показал эффективность использования временных стохастических раскрашенных сетей Петри как цифровых двойников для виртуальных испытаний. На основе иерархических сетей Петри можно строить сложные модели, описывающие взаимосвязанные процессы между подсистемами и агрегатами изделий. Разработана общая модель в виде иерархической сети, предназначенная для исследования процессов старения, износа и деградации агрегатов и элементов технического объекта, а также формирования стратегии прогнозного обслуживания. Модель включает диаграмму Ганта выполнения производственных задач, множество активных и резервных агрегатов, модули технического обслуживания и ремонта. Рассмотрены примеры имитационных моделей на сетях Петри для различных технических систем. Приведены решения для гибких производственных систем, железнодорожных мостов, морских ветряных турбин, парка самолетов, группы роботизированных автомобилей, комплекса компьютерной техники предприятия. Рассмотрены модели различных стратегий технического обслуживания и показана общность моделей, основанных на иерархических сетях Петри. Проведен анализ существующих программных средств для реализации временных стохастических раскрашенных сетей Петри. В заключение сделан вывод о перспективности применения имитационных моделей на сетях Петри для организации технического обслуживания и ремонта сложных технических объектов и систем.*

Ключевые слова: системный анализ, киберфизические системы, прогнозное техническое обслуживание, стратегия обслуживания «каннибализация», виртуальные

* Орлов Сергей Павлович, профессор кафедры «Вычислительная техника», доктор технических наук.

Сусарев Сергей Васильевич, и.о. зав. кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами», кандидат технических наук.

Введение

Современные сложные киберфизические системы оснащены подсистемами мониторинга параметров и средствами коммуникации с удаленными системами обработки информации и управления [1]. Это обеспечивает переход от периодического технического обслуживания (ТО) к прогнозному, или предсказательному ТО (Predictive Maintenance), которое является компонентом концепции «Индустрия 4.0» и использует технологию «Интернет вещей» (IoT-технология) [2–4].

Современный подход к управлению жизненным циклом технического объекта включает в себя базовую компоненту – виртуальный ввод в эксплуатацию изделия (Virtual Commissioning) [5, 6]. Виртуальный ввод в эксплуатацию охватывает широкий спектр задач: от создания концепции и конструкции изделия до проектирования производственных линий и цехов.

Одним из компонентов виртуального ввода являются виртуальные испытания на основе «цифровых двойников» и широкого использования имитационного моделирования. Создание моделей износа и деградации элементов конструкции в сочетании с обработкой больших объемов данных о техническом состоянии анализируемых агрегатов обеспечивает раннее обнаружение и прогнозирование отказов оборудования. Применение имитационных моделей процесса работы агрегатов на этапе виртуального ввода в эксплуатацию дает возможность сформировать эффективную стратегию технического обслуживания, определить оптимальный баланс между затратами на проведение технологических операций и величиной потенциальных потерь от отказа оборудования.

В настоящей статье рассматриваются современные подходы к моделированию технического обслуживания и ремонта различных сложных технических объектов, объединенные использованием аппарата сетей Петри различных модификаций.

1. Имитационное моделирование прогнозного технического обслуживания агрегатов технических систем

Для описания и исследования процессов эксплуатации, технического обслуживания и ремонта наиболее подходят дискретно-событийные системы. Такие модели имитируют поведение системы, рассматривая события, происходящие в определенные моменты времени, в соответствии с заданными детерминированными или случайными законами. Хотя многие процессы, определяющие техническое состояние объектов, являются непрерывными и носят вероятностный характер, в дискретно-событийных системах моделирования рассматриваются дискретные потоки событий отказов или появления дефектов.

Анализ известных работ в области организации технического обслуживания и ремонта (ТОиР) показал, что в последний период времени все больше исследователей обращаются к моделям на сетях Петри [7–9]. Используются различные модификации сетей Петри, при этом наиболее эффективными являются временные раскрашенные сети Петри TCPN (Timed Colored Petri Nets) [10].

Формальное определение раскрашенной сети Петри (Colored Petri Net, CPN) [10]:

$$CPN = (P, T, A, C, V, S, G, E, I, \mu), \quad (1)$$

где P – конечное множество позиций; T – конечное множество переходов; $A \subseteq P \times T \cup T \times P$ – множество направленных дуг; C – конечное непустое множество цветов; V – конечное множество типов переменных цветов, таких, что $\text{Type } [v] \in C$ для всех $v \in V$, $S: P \rightarrow C$ – это функция набора цветов для каждой позиции, $G: T \rightarrow \text{EXPR}T$ – функция условий, которая назначает условия для срабатывания каждому переходу, так, что $\text{Type } [G(t)] = \text{Bool}$, $E: A \rightarrow \text{EXPR}A$ – функция, которая присваивает каждой дуге некоторое выражение $\text{EXPR}A$, $I: P \rightarrow \text{EXPR}P$ – это функция инициализации, которая назначает выражение инициализации $\text{EXPR}P$ каждой позиции p , такое, что $\text{Type } [I(p)] = C(p)$, $\mu: P \rightarrow N$ – маркировка сети, задающая количество фишек (маркеров) в позициях.

Временная цветная сеть Петри TCPN является расширением сети, описанной выражением (1):

$$\text{TCPN} = (\text{CPN}, \Theta 1, \Theta 2, \Theta 3), \quad (2)$$

где CPN – основная раскрашенная сеть Петри; $\Theta 1$, $\Theta 2$, и $\Theta 3$ – временные задержки, приписанные местам, дугам и переходам сети соответственно.

Технологические процессы являются стохастическими из-за воздействия многих внешних случайных факторов. Среди применений сетей Петри следует выделить построение стохастических сетей Петри (Stochastic Colored Petri Net, SCPN) для изучения процессов деградации, старения и износа различных узлов, механизмов и машин. Изучение этих явлений и процессов необходимо для организации технического обслуживания и ремонта. Во многих работах были проведены исследования по созданию сетей Петри для моделирования случайных событий с заданными распределениями плотности вероятности. В результате были разработаны различные модификации стохастических раскрашенных сетей Петри.

Ключевым достоинством стохастических сетей Петри является возможность имитировать различные случайные события. Это обеспечивается с помощью механизма назначения выражений позициям, переходам и дугам в сети. В соответствии с определением (1) выражения типа EXPR на выходных дугах переходов представляют собой конструкторы для создания новых фишек по заданному закону.

Рассмотрим ряд применений стохастических раскрашенных сетей Петри для исследования надежности систем, прогноза состояний, организации технического обслуживания.

В статье [11] Santos F. и др. разработали обобщенные сети SCPN с предикатами для моделирования методом Монте-Карло. Время до отказа компонентов считается распределенным по закону Вейбулла. Marsan M. [12] предложил моделировать случайные процессы на переходах сети Петри с помощью задержек с отрицательными экспоненциальными функциями плотности вероятности.

Стохастические цветные сети Петри используются для широкого класса объектов, особенно при оценке ремонтпригодности и надежности. Lu Z. и др. в работах [13–15] исследовали применение кортежей SCPN и вычисление требуемых ресурсов в соответствии с уравнениями состояния модели. Расходные и повторно используемые ресурсы представлены в виде мультимножеств в позициях стохастической сети Петри. Моделирование технического обслуживания позволяет оценить потребности в ресурсах на каждом этапе эксплуатации агрегатов.

Известны примеры эффективного использования SCPN при изучении обслуживания системы совместного использования электромобилей [16], исследова-

нии деградации и разрушения керамических покрытий [17] и моделировании киберфизических систем [18]. Разрабатываются имитационные модели на SCPN, в которых интегрируются модели надежности и модели физических явлений с тем, чтобы отслеживать эволюцию состояния защиты плотин от природных явлений и улучшать процессы принятия решений по техническому обслуживанию гидросооружений [19].

Иерархические сети (Hierarchical Petri Net, HPN) являются обобщением сетей Петри и служат для моделирования киберфизических систем с ярко выраженной иерархической организацией [20, 21]. Иерархическая сеть в отличие от обыкновенных сетей Петри содержит переходы двух типов: простые и составные (подстановочные). В составные переходы могут быть вложены другие, возможно, также иерархические, сети. Срабатывание такого перехода характеризует выполнение полного жизненного цикла вложенной сети.

2. Комплекс моделей процесса технического обслуживания агрегатов

В общем случае комплекс имитационных моделей для виртуальных испытаний и организации технического обслуживания и ремонта представляет собой цифровые двойники агрегатов A_1, \dots, A_N , выполняющих наборы производственных задач Z_1, \dots, Z_N соответственно (рис. 1). Кроме того, комплекс содержит имитационный модуль операций ТОиР, а также имитационные модели процессов износа, деградации и отказов агрегатов.

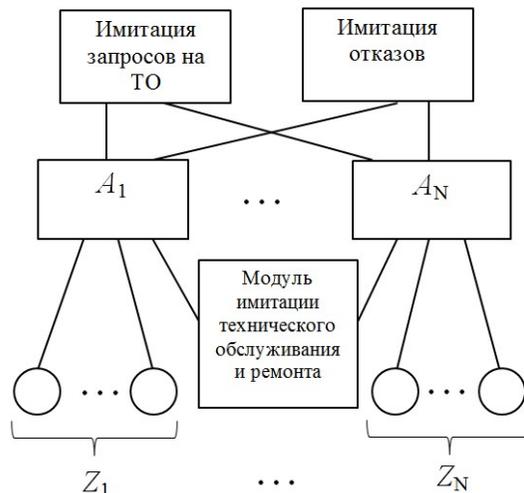


Рис. 1. Комплекс имитационных моделей для организации ТОиР

Процессы эксплуатации агрегатов и их технического обслуживания и ремонта можно представить в виде графовой модели, пример которой приведен на рис. 2.

Множество всех агрегатов технического объекта обозначим как $A_U = (A_1, \dots, A_N)$. При этом $A = \{A_i\}$ – подмножество активных агрегатов, работающих в данный момент; $A^T = \{A_i^T\}$ – подмножество агрегатов, находящихся в состоянии ТО или ремонта; $A^R = \{A_j^R\}$ – подмножество резервных агрегатов, которые могут быть использованы в эксплуатации: $A_U = A \cup A^T \cup A^R$. Произ-

водственные задачи $Z = \{z_1, \dots, z_K\}$ выполняются в соответствии с диаграммой Ганта процесса эксплуатации. Для выполнения ТОиР используются повторно используемые ресурсы R_1 и расходные ресурсы R_2 .

Во многих случаях для оперативного обслуживания или ремонта могут использоваться мобильные станции технического обслуживания МСТО. Они обеспечивают обслуживание агрегатов на месте их расположения. Это характерно для автомобильного и железнодорожного транспорта, нефте- и газоперекачивающего оборудования, ветряных установок производства электроэнергии и др.

Приведенная графовая модель может служить основой для построения имитационных моделей на сетях Петри.

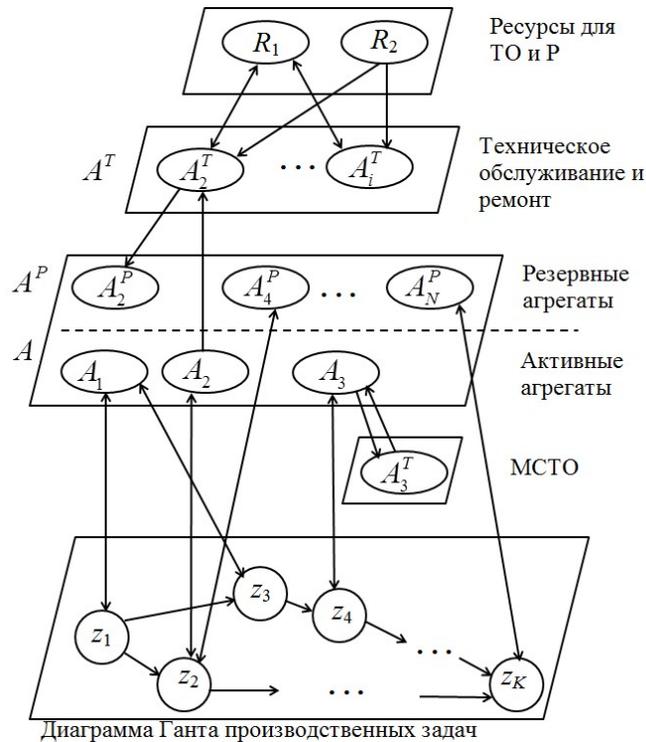


Рис. 2. Взаимосвязь компонентов системы эксплуатации агрегатов или изделий

Наиболее перспективен подход, базирующийся на использовании иерархической сети Петри для описания взаимодействующих гетерогенных систем и объектов. В этом случае возможны две стратегии создания иерархической сети: восходящая разработка и нисходящая разработка. В первом случае разрабатываются отдельные, достаточно простые модели, которые используются затем как составные переходы, образуя более сложную сеть Петри. Во втором случае создание общей модели начинается с формирования высоких уровней иерархии. Затем каждый составной переход заменяется низкоуровневой моделью.

Для многих приложений вид иерархической сети Петри для моделирования ТОиР имеет общую структуру, которая показана на рис. 3. На верхнем уровне находятся модели агрегатов или объектов в виде «цифровых двойников», которые описывают внутреннюю динамику функционирования. На этом же уровне

реализуется модуль, связывающий график производственного или технологического процесса с назначением конкретных агрегатов определенным задачам в заданные периоды времени. На этом этапе могут использоваться методы дискретной оптимизации для решения задачи о назначениях. Пример использования оптимизационно-имитационного подхода для решения аналогичной проблемы приведен в работе [22]. В результате получаем распределение активных агрегатов по задачам и формирование множества резервных агрегатов.

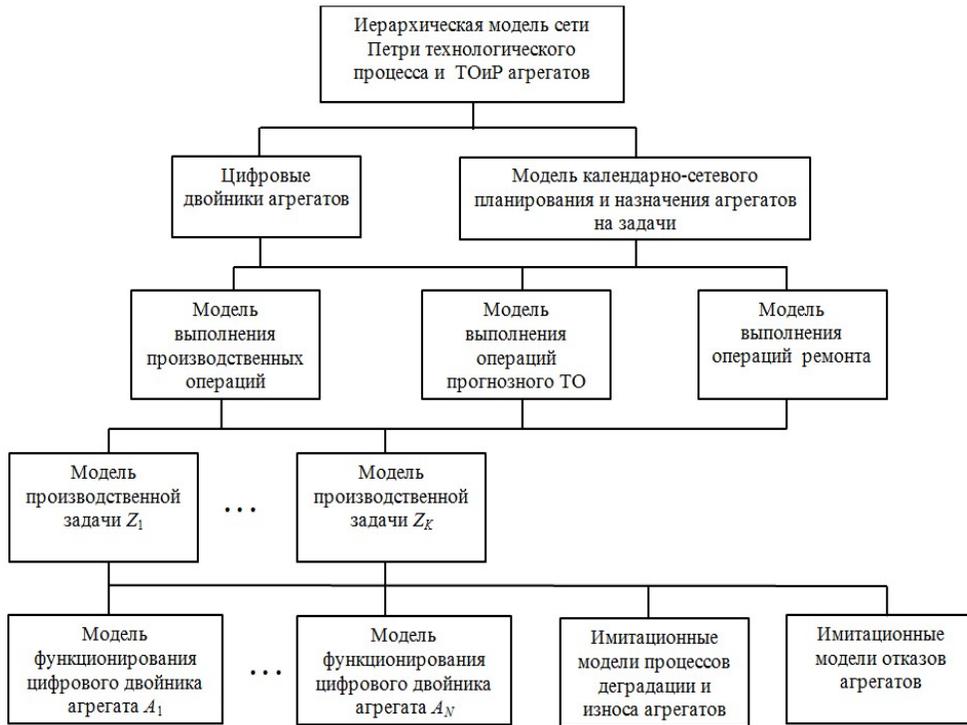


Рис. 3. Структура иерархической модели на сетях Петри

На следующих уровнях формируются имитационные модели Петри по каждой производственной операции, а также для операций технического обслуживания и ремонта. Нижний уровень иерархии содержит детальные модели цифровых двойников с помощью представления цветных позиций сети Петри в виде совокупности мультимножеств узлов и агрегатов.

Основная функция этих моделей – анализ выполнения процессов и определение временных показателей:

- время работы агрегата после последнего обслуживания или ремонта;
- остаточный ресурс;
- оставшееся время до технического обслуживания по расписанию;
- начальный момент времени нового периода эксплуатации;
- суммарное время наработки агрегата,

которые используются для управления остаточным сроком службы агрегата и определения регламента технического обслуживания.

Задание различных распределений случайных событий обеспечивает моделирование износа, деградации и дефектов в узлах и агрегатах.

3. Применение моделей на стохастических временных раскрашенных сетях Петри для анализа технического обслуживания и ремонта

В большинстве рассмотренных источников имитационные модели на раскрашенных сетях Петри реализуются с помощью программного средства CPN Tools [23]. Указанный инструмент имеет развитый графический интерфейс, достаточно понятный язык программирования модели, широкие функциональные возможности, в том числе для имитации различных случайных законов распределения вероятностей событий.

3.1. Гибкие производственные системы

Сетевая модель Петри обеспечивает интуитивно понятное графическое представление сложной динамической системы.

Среди множества практических приложений сетей Петри выделяются работы, связанные с моделированием гибких производственных систем. В ранних работах была продемонстрирована эффективность различных сетей Петри для моделирования производственных систем с целью прогнозирования дефектов и отказов элементов и узлов [24–26]. Затем были созданы новые средства для исследования гибких производственных систем, которые позволили моделировать процессы деградации и износа оборудования [27, 28].

Guo Z. и др. разработали метод самоадаптивной совместной работы для обеспечения высокого уровня сотрудничества между производственными процессами и логистикой в гибкой производственной системе [29]. Используются временные цветные сети Петри для производственно-логистических систем с поддержкой Интернета вещей. Метод сочетает в себе график последовательностей цветных фишек во временной цветной сети Петри с текущим статусом ключевого производственного и логистического оборудования. На рис. 4 показана временная раскрашенная сеть Петри для самоадаптирующейся системы производственных и логистических операций, использующих беспилотные автомобили (БП) [29].

Переходы в сети являются составными и могут описываться вложенными в них сетями Петри. Переходы T_1 и T_3 описывают готовность работ, а переходы T_2 и T_4 – готовность материалов. Задание технологического процесса и логистической операции проводится переходом T_5 . Переходы T_7 и T_9 имитируют выбор БП для перевозки материалов и продукции и формирование маршрута. Моделирование хранения продукции выполняется на переходах T_8 и T_{10} . Завершающие цикл операции движения и разгрузки БП имитируются переходами T_{11} – T_{14} .

Позиции в сети содержат цветные фишки, определяющие условия срабатывания переходов. Позиция P_1 соответствует производственной задаче, а позиция P_2 – исполнителю работ. Позиции P_3 , P_5 и P_7 определяют вид и количество материала. Позиции P_4 описывает готовность исполнителя работ, а P_6 – отсутствие исполнителя. Состояние БП задается фишками в позициях P_8 и P_9 . Набор позиций P_{10} – P_{16} служит для задания условий по выполнению производственной задачи и логистических операций. Позиции P_{17} – P_{22} определяют условия по транспортировке груза к выбранной точке назначения. Завершение операций и начало следующего цикла представляются позицией P_{23} . Дугам a_1 – a_8 назначаются выра-

жения типа условного оператора для задания логики работы моделируемой системы.

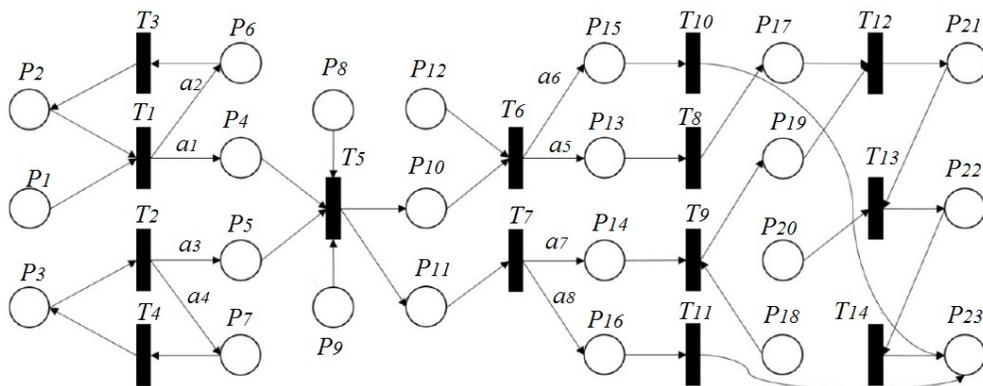


Рис. 4. Сеть Петри для реализации метода самоадаптивной совместной работы

Предложенная модель на временной раскрашенной сети Петри используется для минимизации времени ожидания всех работ, производственного цикла и уменьшение потребления электроэнергии оборудованием и беспилотными автомобилями. Учитываются три ключевых показателя эффективности: время ожидания, срок изготовления изделия и потребление электроэнергии.

С помощью модели, представленной на рис. 4, можно также анализировать параметры надежности и ремонтпригодности оборудования и беспилотных автомобилей. С этой целью разрабатываются сетевые модели нижнего уровня, которые затем подставляются в соответствующие составные переходы основной сети Петри.

3.2. Модели для железнодорожной инфраструктуры

Требования к надежности железнодорожных мостов обусловили внимание исследователей к созданию моделей конструкций мостов и их отдельных компонентов для определения растущих темпов износа из-за увеличения объема трафика и интенсивности нагрузки.

В работах Andrews J., Le B. и др. предложен ряд моделей на базе стохастических временных сетей Петри [30–33]. Модель моста имеет иерархический характер и формируется из подмоделей каждого из компонентов моста. При этом учитывается как износ отдельных компонентов, так и зависимость между процессами износа взаимодействующих компонентов. Время между состояниями в результате ухудшения параметров и проведением технического обслуживания регулируется соответствующими распределениями Вейбулла. Модель сети Петри учитывает процессы деградации, инспекции и ремонта отдельных элементов моста при исследовании альтернативных стратегий обслуживания.

Были введены три новых типа переходов: а) «Переход сброса» уменьшает маркировку заданных позиций до желаемого количества фишек; б) «Условный переход» обеспечивает выбор времени задержки из разных распределений в зависимости от количества фишек в определенной позиции; в) «Опportunистический переход» можно активировать с помощью фишек различных типов в отличие от классического перехода.

Пример сети Петри для описания состояний железнодорожного моста и процесса ТОиР приведен на рис. 5. Эта подмодель служит для контроля трех видов повреждений:

- выкрашивание поверхности элементов – Surface spalling;
- глубокий скол арматуры – Deep spalling;
- коррозия стальной арматуры – Steel corrosion.

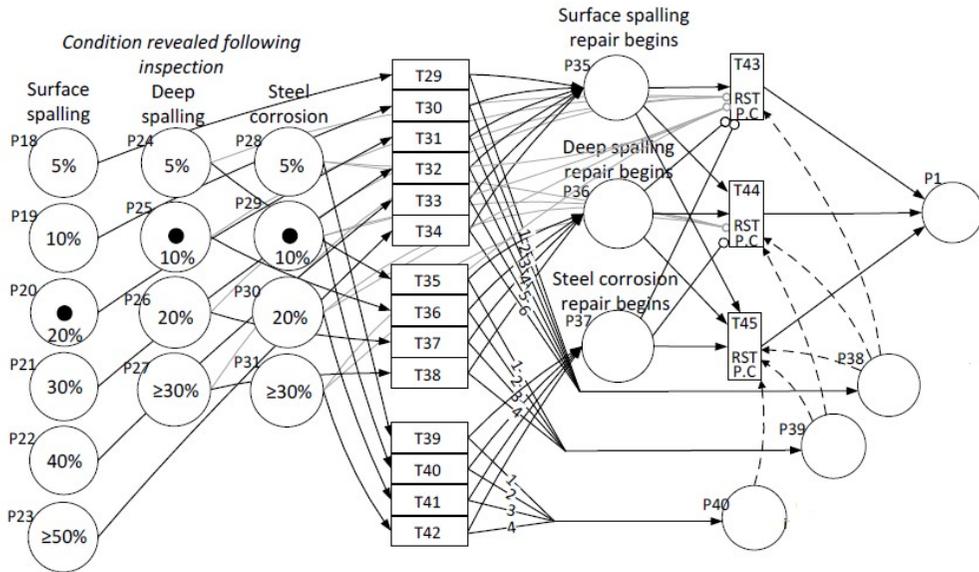


Рис. 5. Сеть Петри для модели технического обслуживания и ремонта железнодорожного моста [30]

Три группы позиций P18–P23, P24–P27 и P28–P31 соответствуют определенным состояниям настила моста. На рис. 5 показана ситуация, когда при осмотре моста обнаруживается 20 % поверхностного выкрашивания (позиция P20), 10 % глубоких сколов (позиция P25) и 10 % коррозии арматурной стали (позиция P29). Переходы T29–T42 управляют временем планирования. Позиции P35–P37 обозначают состояния, в которых фактически начинается ремонт. Переходы T43–T45 генерируют случайные значения времени ремонта, распределенные по двухпараметрическому закону Вейбулла:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right], t \geq 0,$$

где β – параметр формы распределения; η – параметр масштаба распределения случайной величины.

Отметим, что переходы T43–T45 являются специальными условными переходами с реализацией функций сброса и установки условий. В частности, переход T43 регулирует время восстановления после поверхностного выкрашивания. T44 регулирует суммарное время восстановления после поверхностного выкрашивания и глубоких сколов. T45 регулирует общее время ремонта, когда работа включает устранение всех трех видов повреждений. Позиции P38–P40 являются условными позициями, связанными с переходами T43–T45 с помощью пунктир-

ных стрелок, поэтому времена срабатывания этих переходов генерируются на основе количества фишек, присутствующих в этих условных позициях.

Имитационный эксперимент на такой модели позволяет определить периоды технического обслуживания и время ремонта для различных сочетаний степени повреждений моста и разных параметров вероятностных процессов износа элементов.

В работе [32] Le B., Andrews J. и Fecarotti C. предлагают сеть Петри, моделирующую процесс оппортунистического обслуживания (Opportunistic maintenance). Оппортунистическое обслуживание касается многокомпонентных систем. Оно заключается в использовании запланированного останова машины или системы для замены не только изношенной детали или дефектного компонента, но также нескольких частей или близлежащих компонентов, которые еще не находятся в критическом состоянии. Замена детали в критическом состоянии дает возможность превентивно заменить другие детали. Причиной такой перегруппировки мероприятий по техническому обслуживанию обычно является стремление к экономии: часто бывает дешевле произвести полную замену нескольких элементов, чем несколько разовых замен в разное время.

На рис. 6 показана сеть Петри для управления различными уровнями ремонта с возможностью оппортунистического обслуживания.

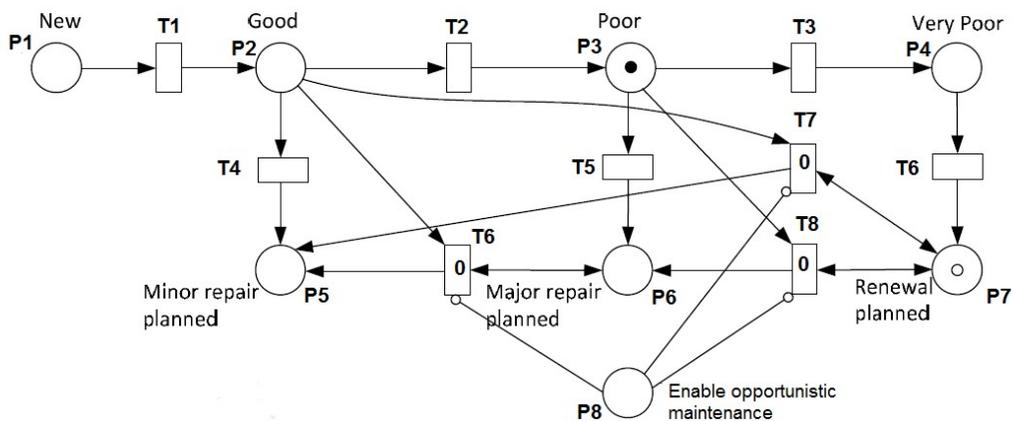


Рис. 6. Сеть Петри для имитации оппортунистического обслуживания [32]: Minor repair – мелкий ремонт; Major repair – капитальный ремонт; Renewal – замена; Enable opportunistic maintenance – готовность к оппортунистическому обслуживанию

Переходы T6, T7 и T8 являются условными переходами, в которых срабатывание зависит от цвета фишек во входных позициях. Белая и черная фишки имитируют два различных элемента моста. В сети Петри моделируется ситуация, когда возникает возможность мелкого ремонта одного элемента при капитальном ремонте или замене другого элемента. Такая сеть может быть преобразована и для обслуживания нескольких элементов.

Моделирование проводилось с использованием метода Монте-Карло с заданными распределениями Вейбулла. Были исследованы четыре стратегии технического обслуживания:

1. Ремонт проводится, как только компонент моста идентифицирован как неисправный.

2. Мелкий ремонт не проводится, рассматриваются только капитальный ремонт и замена.
3. Капитальный ремонт не проводится, рассматриваются только мелкий ремонт и замена.
4. Мелкий и капитальный ремонт не проводятся, рассматривается только замена.

На рис. 7 приведен один из результатов имитационного моделирования на сети Петри, позволяющий оценить различные стратегии обслуживания. Рассматриваются четыре состояния моста: «Новое», «Хорошее», «Плохое», «Очень плохое».

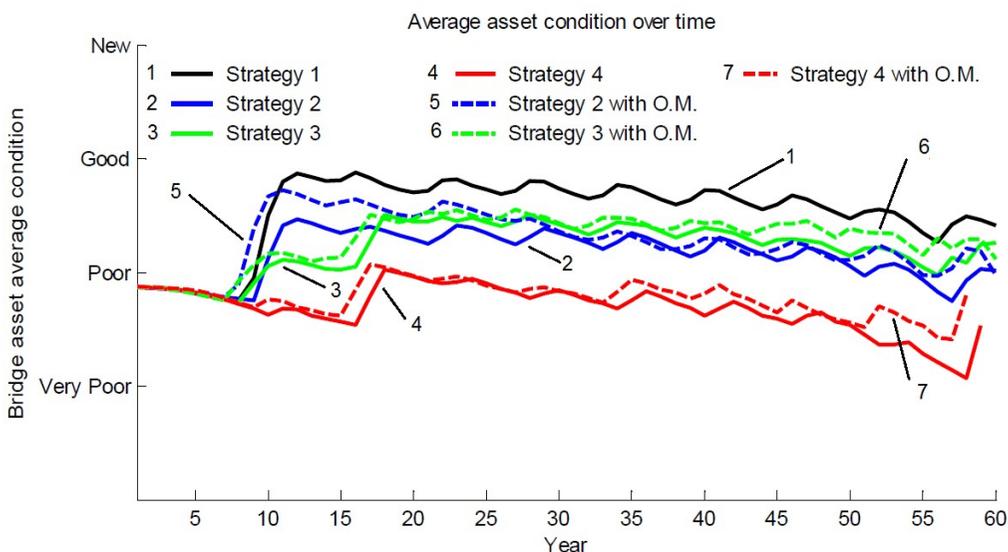


Рис. 7. Влияние различных стратегий ремонта (с оппортунистическим обслуживанием (О.М.) или без него) на состояние элементов моста в среднем [32]

Все графики состояний начинаются в той же точке, что и начальное среднее состояние элементов, близкое к состоянию «Плохое»; при этом предполагается, что каждый компонент подвергается одной и той же стратегии. Так как стратегия 3 предусматривает замену, а также мелкий ремонт, среднее состояние элементов поддерживается на более высоком уровне по сравнению со стратегией 4 и находится между прогнозируемыми средними условиями для стратегий 1 и 2. График также показывает влияние оппортунистического обслуживания. В целом оппортунистическое обслуживание увеличивает вероятность того, что компоненты будут находиться в исправном состоянии. В связи с этим можно ожидать, что политика технического обслуживания с оппортунистическим обслуживанием будет поддерживать состояния элементов с более высокими средними показателями.

Рассмотренный подход к организации технического обслуживания и ремонта мостов был расширен и применен к обслуживанию морских ветровых турбин [34–36]. В статье [36] разработана новая модель технического обслуживания морских ветряных турбин на основе сети Петри для моделирования операций по эксплуатации и техническому обслуживанию на морских ветряных электростан-

циях. С помощью разработанной модели изучаются три новые стратегии технического обслуживания ветряных турбин:

- проведение периодического обслуживания компонентов ветряной турбины в соответствии с их конкретными характеристиками надежности;
- проведение полной проверки всей системы ветряной турбины после капитального ремонта;
- оснащение ветряной турбины системой мониторинга состояния, которая обладает мощными возможностями обнаружения неисправностей.

По результатам исследований на моделях сетей Петри сформированы требования к периодичности контроля и ТОиР турбин.

В работах других ученых сети Петри были успешно использованы:

а) для моделирования и оценки времени поиска и устранения отказов систем железнодорожной автоматики и телемеханики [37];

б) для определения оптимальной стратегии технического обслуживания железнодорожного подвижного состава [38] с помощью аппарата сокращенных сетей Петри (Abridged Petri Nets), которые были введены А. Воловым [39, 40].

3.3. Модели технического обслуживания парка самолетов

Обслуживание парка самолетов представляет собой сложный процесс, включающий политику обслуживания, организацию обслуживания, различные операции и управление ресурсами обслуживания. В работах [41, 42] Sheng J. и Prescott D. развивают иерархическую модель на раскрашенных сетях Петри для организации технического обслуживания самолетов с использованием политики «каннибализма» [43]. Объектами исследования являются самолеты (platforms), которые делятся на две группы: годные к выполнению миссии или задачи (MC – mission-capable) и не готовые к выполнению миссии (NMC – non-mission-capable).

Каннибализация — это деятельность по техническому обслуживанию, которая включает в себя снятие обслуживаемых частей с одного самолета для замены неисправных частей на других самолетах, когда необходимые запасные части недоступны. В результате можно восстановить самолеты, не предназначенные для выполнения задач (NMC), до состояния, пригодного для выполнения задач (MC), за короткое время, когда ресурсов запасных частей парка недостаточно.

Общая структура предложенной авторами модели технического обслуживания парка воздушных судов на базе иерархической раскрашенной сети Петри HCPN представлена на рис. 8.

Модель HCPN состоит из четырех модулей:

- модуль «Парк» моделирует работу парка самолетов, ориентированных на достижение заданных целей;
- модуль «Самолет» имитирует изменения технического состояния самолета;
- модуль «Компонент» имитирует отказы компонентов самолета;
- модуль «Техническое обслуживание» моделирует трехуровневые процессы технического обслуживания парка воздушных судов.

Прямоугольные блоки на рис. 8 являются подстановочными переходами HCPN, которые детализируются и раскрываются путем вложения других сетей Петри.

В статьях [41, 42] предложено и подробно описано большое число частных моделей CPN для всех процессов, обеспечивающих обслуживание самолетов с политиками каннибализации и без каннибализации.

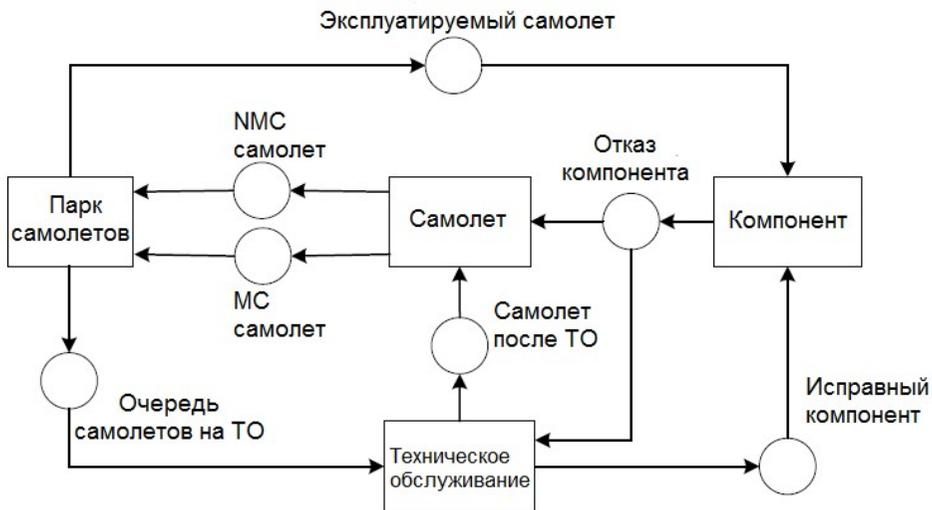


Рис. 8. Структура сети Петри HCPN технического обслуживания парка самолетов [42]

В частности, модуль технического обслуживания, раскрытый на рис. 9, моделирует процесс трехуровневого обслуживания парка с учетом различных политик каннибализации. Он состоит из трех submodule: *O*-уровень, *I*-уровень и *D*-уровень обслуживания.

Трехуровневое техническое обслуживание включает организационный (уровень *O*), промежуточный (*I*-уровень) и уровень депо (*D*-уровень), которым в модели соответствуют подстановочные переходы T1, T2 и T3. Когда самолет выходит из строя из-за отказа компонентов, он обычно обслуживается в организации уровня *O*, где его неисправные компоненты удаляются и заменяются запасными частями. Снятые, вышедшие из строя компоненты направляются в ремонтную организацию *I* уровня для ремонта. Вышедшие из строя компоненты, которые не могут быть отремонтированы на уровне *I*, будут отправлены в депо. После ремонта на уровне *I* или уровне *D* неисправные компоненты возвращаются в парк. Поскольку депо может находиться на значительном расстоянии от оперативной базы парка самолетов, политика каннибализации может быть более желательной, если нет организации по техническому обслуживанию *I*-уровня или такая организация не способна отремонтировать многие неисправные компоненты.

Позиции в модели на рис. 9 описывают состояния самолетов и очереди на техническое обслуживание. В свою очередь, подстановочные переходы T1, T2, T3 далее детализируются для имитации событий обслуживания на соответствующих уровнях: *O*, *I* или *D*.

Предложенная авторами модель на раскрашенных сетях Петри была применена к парку самолетов для исследования влияния количества ремонтных бригад на производительность полетов. Это обеспечило предоставление руководству рекомендаций по уровню укомплектованности персоналом технического обслуживания.

На рис. 10 приведены графики, полученные в результате имитационного моделирования. Производительность парка измеряется скоростью выполнения миссии MCR (доля времени, в течение которого самолеты способны выполнять мис-

сии в заданный интервал времени) и частотой прерывания миссии MAR (доля миссий, которые не выполнены из-за аварийных прерываний).

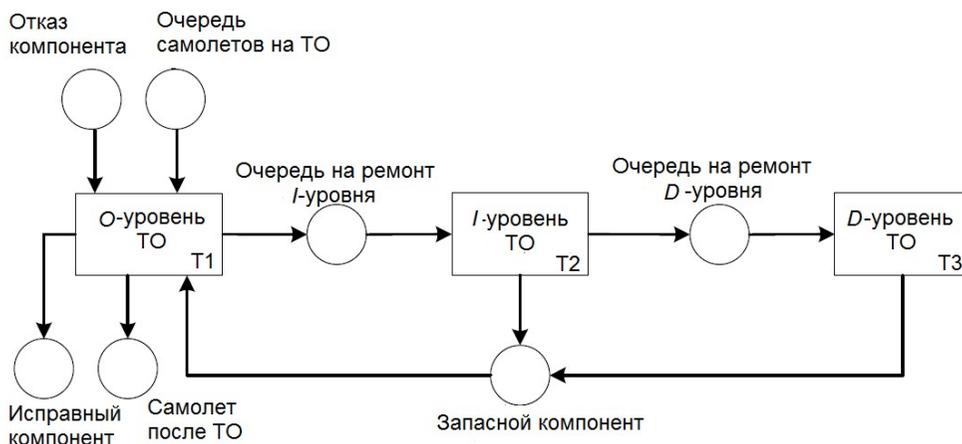


Рис. 9. Имитационная модель уровней технического обслуживания [42]

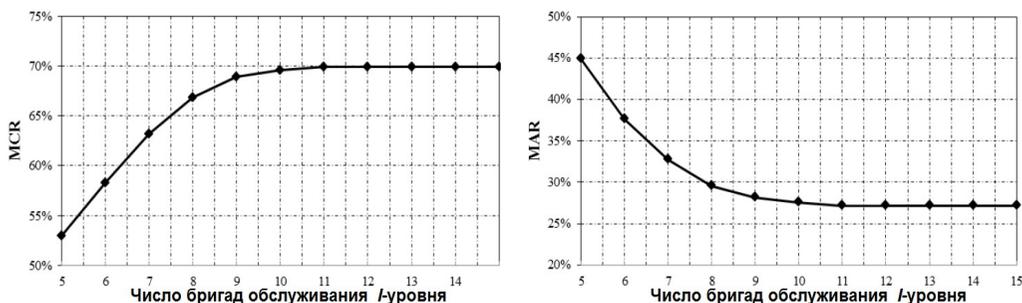


Рис. 10. Результаты имитационного моделирования обслуживания самолетов на I-уровне

Результаты моделирования показывают, что для исследуемого парка самолетов производительность увеличивается с увеличением количества ремонтных бригад, занятых в организации по техническому обслуживанию I-уровня. Это ожидаемо, так как большее число ремонтных бригад I-уровня обеспечивает ремонт в кратчайшее время большего количества вышедших из строя сменных блоков. При этом увеличивается количество готовых к эксплуатации самолетов и уменьшается число наземных отказов. Из рис. 10 видно, что при 11 бригадах, задействованных на I-уровне обслуживания, использование большего количества персонала не дает преимуществ для производительности парка самолетов.

3.4. Сети Петри для виртуальных испытаний и планирования технического обслуживания роботизированных автомобилей агротехнического назначения

Методология применения сетей Петри для исследования эксплуатации и обслуживания была использована при разработке роботизированных сельскохозяй-

ственных автомобилей (РА) в Самарском государственном техническом университете в совместной НИР с ОАО «КАМАЗ». Модели предназначены для проведения виртуальных испытаний РА с целью определения эффективных стратегий технического обслуживания и ремонта [44–47].

В раскрашенных сетях Петри исследуемые объекты описываются цветными фишками в виде мультимножеств. В табл. 1 приведен глобальный набор цветов сети Петри для роботизированного автомобиля, при этом каждый цвет соответствует одному из параметров, определяющих техническое обслуживание РА.

Таблица 1

Набор цветов модели технического обслуживания роботизированного автомобиля

Множество цветов	Элементы множества	Значение
N	$\{n_1, \dots, n_J\}$	Индивидуальный номер автомобиля, J – количество РА
$Model$	$\{m_1, \dots, m_S\}$	Модель РА, S – количество моделей
Mdf	$\{mdf_{1i}, \dots, mdf_{ri}\}, i = \overline{1, S}$	Модификация модели, r – число модификаций i -й модели
mil	$\{mil_j\}, j = \overline{1, J}$	Пробег j -го РА, км
RM	$\{t_{jk}\}, j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K_j}$	Множество периодов времени до технического обслуживания агрегатов j -го РА, K_j – число контролируемых агрегатов в j -м РА
RL	$\{tr_{jk}\}, j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K_j}$	Множество значений остаточных ресурсов узлов и агрегатов j -го РА

Простые множества цветов содержат однородные элементы одного цвета. Составные множества цветов состоят из комбинации простых множеств цветов. Мультимножества содержат элементы с определенной кратностью, то есть имеется несколько копий элемента.

Временные метки для цветных фишек обозначаются как " $@\eta$ ", где η – количество тактов модельного времени.

В рассматриваемой модели мультимножество определяется по глобальному набору цветов и, например, для двух автомобилей имеет вид

$$1^{\wedge}(n_1, m_1, mdf_1, rm_1, rl_1) + 1^{\wedge}(n_2, m_2, mdf_2, rm_2, rl_2).$$

Табл. 2 и 3 содержат описание переходов и позиций для имитационной модели процесса эксплуатации, представленной на рис. 11.

На рис. 11 для упрощения описания роботизированного автомобиля используется сокращенное мультимножество цветов $RV = \{N, "Model", Mdf\}$.

На рис. 11 показано состояние модели после 200 циклов выполнения комплекса задач $Z = \{Z_1, \dots, Z_S\}$. Модельное время равно 0,5 часа за 1 такт. В результате статистического эксперимента получаем, что время выполнения задач с учетом ТОиР равно 849 часов притом, что идеальное время (без отказов и ТО) должно быть равно 800 часов. На вывод из эксплуатации и замену РА затрачено 49 часов. При этом видно, что в позицию Reserve поступили два автомобиля: один – после ТО через 251,5 часа, второй – после ремонта через 755 часов от начала работы системы. Также показано, в какие моменты времени в будущем автономный автомобиль будет выведен из эксплуатации: а) запрос на ТО придет через 941 час; б) ремонт потребует через 1188 часов.

Описание переходов в имитационной модели

Переходы	Значение и события
z_1	РА движется к целевой точке (ТР)
z_2	РА маневрирует вблизи ТР после прибытия
z_3	РА выполняет технологическую операцию
z_4	РА маневрирует вблизи ТР при отбытии
z_5	РА движется к базовой точке (ВР)
t_F	Запрос на вывод РА из эксплуатации из-за отказа оборудования
F	Вывод РА из текущей эксплуатации для ремонта
t_Q	Запрос на вывод РА из эксплуатации при техническом обслуживании
M	РА выводится из текущей эксплуатации для технического обслуживания
t_R	Ремонт РА
t_M	Техническое обслуживание РА
R1	Возврат РА из резерва в эксплуатацию после ремонта
R2	Возврат РА из резерва в эксплуатацию после технического обслуживания

Срабатывание перехода t_F определяется законом Пуассона с заданной интенсивностью отказов, а перехода t_Q – равномерным законом случайных событий запросов на ТО.

В иерархической модели обслуживания РА, построенной на принципах, иллюстрированных на рис. 2 и 3, одним из основных submodule является сеть Петри, имитирующая назначение РА на задачи TASK AV и выполнение работ (рис. 12). Для детального описания автомобиля, в свою очередь, использована модель RТА, которая является подстановочным переходом в модуле назначения.

Интерпретация позиций в имитационной модели

Позиции	Содержание позиции
ВР	Базовая точка расположения РА и начало маршрута
Mnv1	Окончание движения по маршруту и готовность маневрирования вблизи ТР
ТР in	Прибытие РА в целевую точку и готовность к выполнению операций
ТР out	Отбытие РА из целевой точки и готовность к маневрированию
Mnv2	Окончание маневрирования и готовность к движению по маршруту
Counter	Счетчик циклов выполнения задач
Vehicle	Номер роботизированного автомобиля. Автомобиль готов к выполнению операций
F	Отказ
M	Запрос на техническое обслуживание
Reserve	Резервные автомобили, готовые к выполнению операций
P1, P2, P3, P4	Вспомогательные позиции
P5	Разрешение на ремонт РА
P6	Разрешение на техническое обслуживание РА

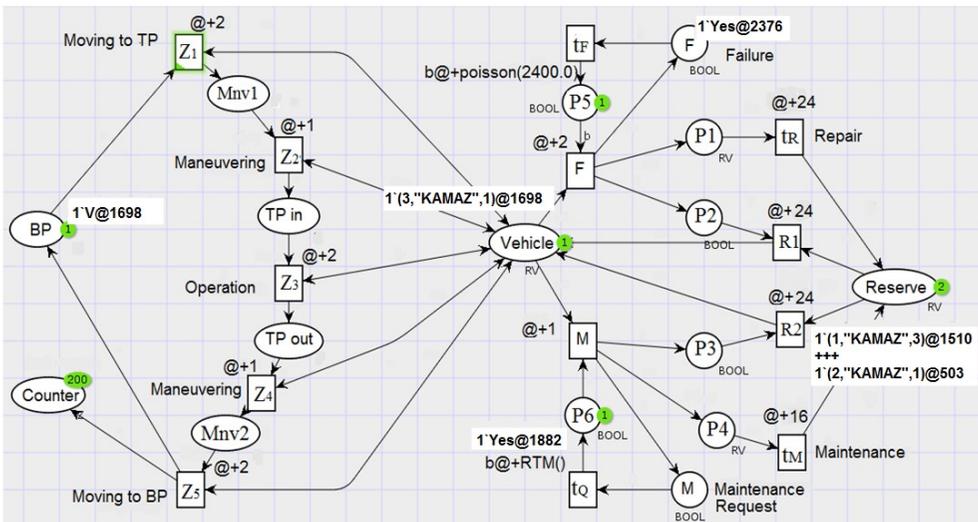


Рис. 11. Сеть Петри SCPN для группы роботизированных автомобилей «КАМАЗ» [46]

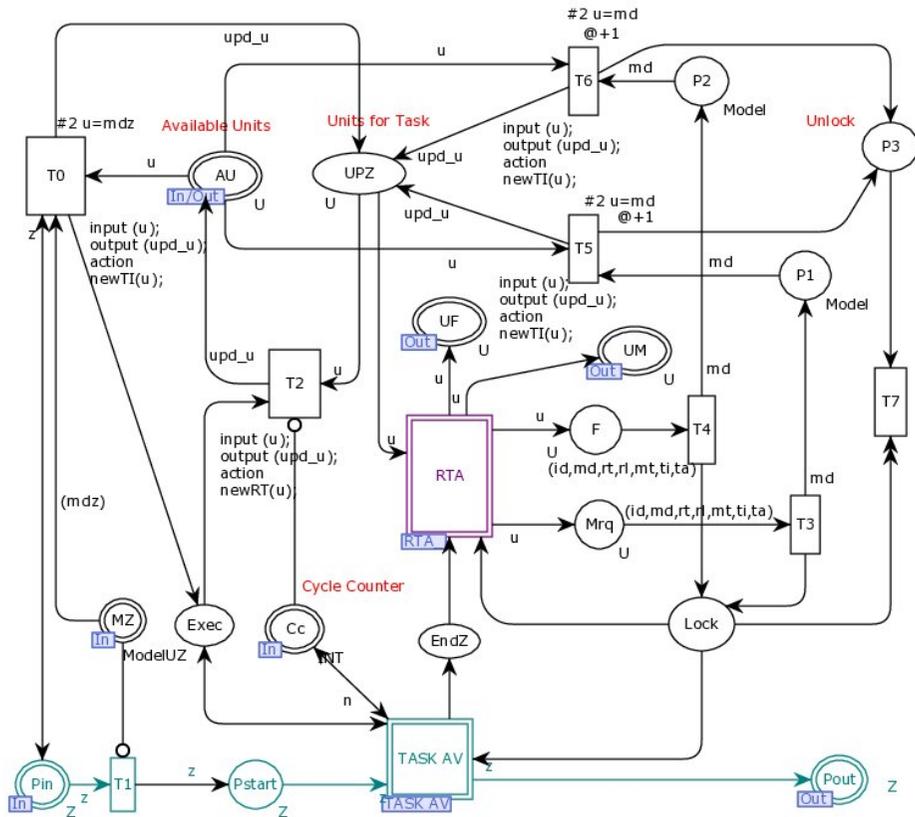


Рис. 12. Модуль назначения РА и имитации процесса эксплуатации [21]

В результате виртуальных испытаний роботизированных автомобилей на иерархической сети Петри определяется комплекс следующих характеристик.

1. Эффективность ремонтпригодности: оценивается по выполнению заданного графика технологического процесса. Для этого в модели используется коэффициент задержки планового срока выполнения задачи, который определяется на сети Петри в ходе статистических испытаний методом Монте-Карло.

2. Задача подбора необходимого множества автомобилей различных моделей и модификаций: базируется на определении относительной загрузки РА при разных сценариях технологического процесса.

3. Количество резервных РА, необходимых для минимизации задержек выполнения задач, связанных с ремонтом или техническим обслуживанием.

4. Стоимость образования резерва автомобилей и величина потерь от приостановки производственных операций.

3.5. Организация эксплуатации и обслуживания компьютерной техники крупного предприятия

Системный характер стохастических раскрашенных сетей Петри обусловил эффективность их применения для моделирования обслуживания и ремонта технических объектов различной природы. Описанная выше методология построения иерархической сети Петри для ТООР была использована при разработке системы поддержки принятия решений по управлению компьютерной техникой крупного предприятия [48, 49]. Базовый модуль на сети Петри для организации прогнозного обслуживания группы компьютеров в проектом подразделении предприятия приведен на рис. 13.

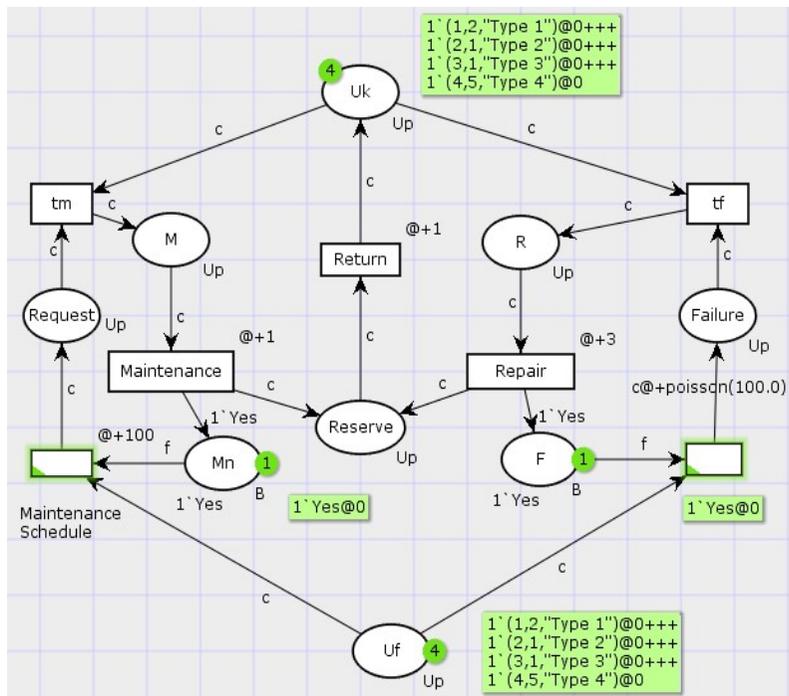


Рис. 13. Модуль ТООР компьютерной техники с реализацией пуассоновского закона появления отказов

Позиция Uk содержит цветные фишки, соответствующие используемым компьютерам определенных типов: «Инженерный», «Графическая рабочая станция», «Офисный», «Сервер». Левая часть сети имитирует запросы на прогнозное техническое обслуживание и вывод компьютера на ТО из эксплуатации, правая часть сети описывает появление отказов и вывод компьютеров на ремонт. Позиция Reserve содержит множество компьютеров, прошедших ТО или ремонт.

Полный анализ результатов имитационного эксперимента на сети Петри позволяет определить:

- наилучшее значение периода технического обслуживания;
- максимально допустимое время ремонта компьютеров различных конфигураций;
- задачи, которые наиболее часто останавливались по причине ремонта или обслуживания компьютеров;
- коррекцию предварительного распределения компьютеров.

4. Программные средства имитационного моделирования на сетях Петри

Широкое применение сетей Петри как инструмента имитационного моделирования вызвало разработку ряда программных продуктов, поддерживающих построение и исследование сетевых моделей различных модификаций.

Наибольшими функциональными возможностями, развитым графическим редактором и методическим сопровождением обладает программная система CPN Tools V. 4.0 [23]. Основными архитекторами этого инструмента являются К. Йенсен, С. Кристенсен, Л.М. Кристенсен и М. Вестергаард [10]. Программа CPN Tools работает на платформах Windows и Linux и является свободно распространяемым программным обеспечением. В большинстве известных работ по моделированию на временных раскрашенных сетях Петри приводятся иллюстрации примеров сетей Петри, выполненных в среде CPN Tools. На русском языке выпущено хорошее учебное пособие по работе с этой программной системой [50].

В известной системе моделирования MATLAB отсутствует универсальное приложение для работы с сетями Петри. В то же время существует локальная версия инструментов для сетей Петри – Petri Net Toolbox [51]. Это программный инструмент для моделирования, анализа и проектирования систем с дискретными событиями на основе моделей сетей Петри. Временные сети могут быть детерминированными или стохастическими. Пользователи могут рисовать, сохранять и извлекать модели сети Петри, а также запускать процедуры моделирования, анализа и проектирования. Доступны анимированные демонстрации и интерактивная справка. Все процедуры, доступные в Petri Net Toolbox, реализованы в виде файлов MATLAB и построены по модульному принципу. Данный продукт является коммерческим и распространяется фирмой MathWorks, Inc, для совместной работы с системой MATLAB.

Другой подход реализован в достаточно мощном инструменте верификации динамических процессов на временных сетях Петри (TAPAAL/UPPAAL) [52]. Инструмент TAPAAL предлагает графический редактор для рисования моделей TAPN, симулятор для экспериментов с созданными сетями и среду проверки, которая автоматически отвечает на логические запросы, сформулированные в подмножестве темпоральной логики CTL.

В работе [53] указанное программное обеспечение применено к анализу системы динамических точек на метрическом графе (DP-система). Эта динамическая модель рассматривается в теории геометрических дискретных динамических систем; кроме того, DP-системы могут использоваться для приближенного представления динамики распространения сообщений в распределенных системах.

Заключение

В обзоре обобщены подходы к решению задач организации технического обслуживания сложных систем, использующие в качестве инструмента исследований временные стохастические раскрашенные сети Петри. Практика их применения показала высокую эффективность при системном анализе сложных объектов. Приведенные примеры имитационных моделей для различных задач демонстрируют возможности анализа таких параметров, как периоды технического обслуживания, остаточный ресурс, ремонтпригодность, время восстановления после ремонта и другие.

Анализируя различные подходы, модели на сетях Петри и решения, можно предложить следующую методику имитационного моделирования при организации технического обслуживания технических объектов.

1. Составляется календарно-сетевой график выполнения объектами заданного множества производственных задач.

2. На основе известных данных определяются вероятностные законы случайных процессов, событий и значений ключевых параметров объектов, связанных с эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом.

3. Решается задача оптимального назначения технических объектов на производственные задачи в соответствии с календарно-сетевым графиком и имеющимися ресурсами.

4. Строится иерархическая сеть Петри для имитации эксплуатации объекта и его обслуживания.

5. В рамках виртуальных испытаний объектов проводятся статистические эксперименты на иерархической сети с разными сценариями.

6. По результатам имитационного эксперимента принимаются решения по корректировке первоначального распределения объектов по задачам, выбираются стратегии технического обслуживания и определяются их временные характеристики.

Перспективность сетей Петри для системного анализа подтверждается постоянным развитием их возможностей. За последние годы был предложен ряд расширений классических сетей Петри. Здесь должны быть отмечены:

1. Концепция «стареющих» маркеров (фишек с памятью), предложенная В. Воловым [54]. Ключевой особенностью настоящей формулировки является введение в сети Петри нового типа маркеров, метки которых могут непрерывно меняться в течение периода, когда разрешен переход. Такие маркеры могут сосуществовать в позиции вместе с обычными цветными и неокрашенными жетонами. Полученная структура обеспечивает гибкое и прозрачное графическое моделирование с превосходной репрезентативной мощностью, что особенно подходит для моделирования надежности системы с неэкспоненциально распределенным временем срабатывания.

2. Класс вложенных сетей, развиваемый И.А. Ломазовой и др. [55, 56].

3. Сети ввода-вывода между позициями и переходами (сети ЮРТ), предло-

женные Barros J. и Gomes L. [57, 58] и ориентированные на проектирование сетевых встроенных контроллеров и моделирование глобально-асинхронных и локально-синхронных систем.

Анализ известных работ в рассматриваемой области показывает, что имеется достаточно большое число программных средств для реализации моделей на сетях Петри. Тем не менее можно рекомендовать CPN Tools [23] как наиболее удобный и многофункциональный инструмент для работы с временными стохастическими раскрашенными сетями Петри.

Публикационная активность в отечественных и международных журналах свидетельствует о научном интересе к аппарату сетей Петри, его потенциале и успешном применении при имитационном моделировании эксплуатации и обслуживания систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lee E.A., Seshia S.A. Introduction to embedded systems, A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edn. The MIT Press, USA, 2017.
2. Chachada A. et al. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture // Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, Italy. IEEE Xplore, 2018.
3. Sang G.M., Xu L., Vriete P., Bai Y., Pan F. Predictive Maintenance in Industry 4.0 // Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020), Lecce, Italy. 2020.
4. Щербakov M.B., Сай Ван К. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 186–194.
5. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.
6. Stiß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Klodowski A., Bär T., Diedrich C. Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems // Proceedings of 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin. 2016. Pp. 1–9.
7. Пуперсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.
8. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.
9. Wang J. Time Petri Nets. In: Timed Petri Nets. The Kluwer International Series on Discrete Event Dynamic Systems. Boston, MA: Springer, 1998. Vol. 9.
10. Jensen K., Kristensen M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. 382 p.
11. Santos F.P., Teixeira A.P., Soares C.G. Modeling, simulation and optimization of maintenance cost aspects on multi-unit systems by stochastic Petri nets with predicates // Simulation. 2018. Vol. 95. Pp. 461–478.
12. Marsan M.A. Stochastic Petri nets: An elementary introduction // Advances in Petri Nets 1989. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 424. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990.
13. Lu Z. System Maintainability Modeling Method Based on Colored Stochastic Time Petri Net // Journal of Mechanical Engineering. 2011. Vol. 47. Pp. 185–192.
14. Lu Z., Liu J., Dong L., Liang X. Maintenance Process Simulation Based Maintainability Evaluation by Using Stochastic Colored Petri Net // Appl. Sci. 2019. Vol. 9, 3262.
15. Yang S.K., Liu T.S. A Petri net approach to early failure detection and isolation for preventive maintenance // Quality and Reliability Engineering International. 1998. Vol. 14. Pp. 319–330.
16. Hamroun A., Labadi K., Lazri M. Modelling and Performance Analysis of Electric Car-Sharing Systems Using Petri Nets // Proceedings of E3S Web Conference. 2020. Vol. 170, 03001.
17. Ferreira C., Neves L.C., Silva A., De Brito J. Stochastic maintenance models for ceramic claddings // Structure and Infrastructure Engineering. 2019. Vol. 16. Pp. 1–19.

18. *Kucera E., Haffner O., Drahoš P., Leskovský R., Cigánek J.* PetriNet Editor + PetriNet Engine: New Software Tool // *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10, 7662.
19. *Chahrouh N., Nasr M., Tacnet J.-M., Bérenguer C.* Deterioration modeling and maintenance assessment using physics-informed stochastic Petri nets: Application to torrent protection structures // *Reliability Engineering and System Safety.* 2021. Vol. 210, 107524.
20. *Lorbeer J.-U., Padberg J.* Hierarchical, Reconfigurable Petri Nets// *Workshops at Modelierung 2018, Petri Nets and Modeling 2018 (PeMod18).* Hamburg, Germany: Hamburg University of Applied Sciences. 2018. Vol. 2060. Pp. 167–186.
21. *Orlov S.P., Susarev S.V., Uchaikin R.A.* Application of Hierarchical Colored Petri Nets for Technological Facilities' Maintenance Process Evaluation // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, 5100.
22. *Учайкин Р.А., Орлов С.П.* Задача распределения средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки.* 2019. № 27(4). С. 84–98.
23. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets [Электронный ресурс]. – URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (дата обращения 20.09.2022).
24. *Barros T.C., De Figueiredo J.C., Perkusich A.* A Fault Tolerant Colored Petri Net Model for Flexible Manufacturing Systems // *J. Braz. Comput. Soc.* 1997. Vol. 4(2).
25. *Wang L.-C., Wu S.-Y.* Modeling with colored timed object-oriented Petri nets for automated manufacturing systems // *Computers & Industrial Engineering.* 1998. Vol. 34 (2). Pp. 463–480.
26. *Yan H.-S., Wang N.-S., Zhang J.-G., Cui X.-Y.* Modelling, scheduling and simulation of flexible manufacturing systems using extended stochastic high-level evaluation Petri nets // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 1998. Vol. 14(2). Pp. 121–140.
27. *Riascos L.A.M., Moscato L.A., Miyagi P.* Detection and treatment of faults in manufacturing systems based on Petri Nets // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2004. Vol. 26. Pp. 280–289.
28. *Kahraman C., Tiyyüz F.* Manufacturing System Modeling Using Petri Nets // *Computational Intelligence.* Berlin/Heidelberg, Germany: Springer Science and Business Media LLC. 2010. Vol. 252. Pp. 95–124.
29. *Guo Z., Zhang Y., Zhao X., Song X.* A Timed Colored Petri Net Simulation-Based Self-Adaptive Collaboration Method for Production-Logistics Systems // *Appl. Sci.* 2017. Vol. 7, 235.
30. *Le B., Andrews J.* Petri net modelling of bridge asset management using maintenance-related state conditions // *Structure and Infrastructure Engineering.* 2016. Vol. 12. Issue 6. Pp.730–751.
31. *Yianni P.C., Rama D., Neves L.C., Andrews J.D.* Railway bridge asset management using a Petri-Net modelling approach // *Life-Cycle of Engineering Systems. Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure.* London, UK: CRC Press, 2016. Pp. 1964–1971.
32. *Le B., Andrews J., Fecarotti C.* A Petri net model for railway bridge maintenance // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability.* 2017. Vol. 231(3). Pp. 306–323.
33. *Fecarotti C., Andrews J.* A Petri net approach to assess the effects of railway maintenance on track availability // *Infrastructure Asset Management.* 2020. Vol. 7. Issue 3. Pp. 201–220.
34. *Le B., Andrews J.* Modelling wind turbine degradation and maintenance // *Wind Energy.* 2016. Vol. 19. Pp. 571–591.
35. *Leigh J.M., Dunnett S.J.* Use of Petri Nets to Model the Maintenance of Wind Turbines // *Qual. Reliab. Eng. Int.* 2014. Vol. 32. Pp.167–180.
36. *Yan R., Dunnett S.* Improving the Strategy of Maintaining Offshore Wind Turbines through Petri Net Modelling // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, 574.
37. *Булавский П.Е., Ваусов О.К., Быстров И.Н.* Моделирование и оценка времени поиска и устранения отказов систем железнодорожной автоматики и телемеханики с помощью сетей Петри // *Автоматика на транспорте.* 2019. Т. 5. № 4. С. 478–492.
38. *Eisenberger D., Fink O.* Assessment of maintenance strategies for railway vehicles using Petri-nets // *Transp. Res. Procedia.* 2017. Vol. 27. Pp. 205–214.
39. *Volovoi V.* Abridged Petri Nets. 2013. arXiv: 1312.2865v1 [cs.OH] 10 Dec 2013. 32 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.academia.edu/27965562/Abridged_Petri_Nets (Дата обращения 10.11.2022).
40. *Volovoi V.* Building business cases for risk and reliability technologies // *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems ESREL.* 2015. Pp. 1769–1777.
41. *Sheng J., Prescott D.* A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalisation // *Reliability Engineering & System Safety.* 2017. Vol. 168. Pp. 290–305.

42. *Sheng J., Prescott D.* A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 189. Pp. 67–88.
43. *Fisher W.W.* Issues and Models in Maintenance Systems Incorporating Cannibalization: A Review // *Information Systems and Operational Research*. 1990. Vol. 28(1), Pp. 154–164.
44. *Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya.* Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399 (044032).
45. *Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Яковлева А.Е.* Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки*. 2021. № 29(1). С. 46–57.
46. *Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А.* Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств // *Известия Санкт-Петербургского гос. технолог. ин-та (технического университета)*. 2021. № 58(84). С. 98–104.
47. *Волхонская Е.Е., Орлов С.П.* Цифровые двойники на сетях Петри для виртуальных испытаний робототехнических транспортных средств // *Инновационное развитие современной науки: теория, методология, практика: сб. статей VI Всеросс. научно-практ. конференции*. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2022. С. 15–21.
48. *Орлов С.П., Учайкин Р.А.* Модели на раскрашенных сетях Петри для управления техническим обслуживанием компьютерного оборудования предприятия // *Пром-Инжиниринг. Труды VII всероссийской научно-технической конференции*. Челябинск. 2021. С. 263–269.
49. *Учайкин Р.А.* Методика поддержки принятия решений при управлении комплексом средств вычислительной техники научного-производственного предприятия на основе гетерогенных системных моделей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. 20 с.
50. *Зайцев Д.А., Шмелева Т.Р.* Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools: учеб. пособие. Одесса: Одесская национальная академия связи, 2006. 60 с.
51. Petri Net Toolbox [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/petri-net-toolbox.html (Дата обращения 09.11.2022).
52. TAPAAL: Tool for Verification of Timed-Arc Petri Nets [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tapaal.net/news/tapaal-3.9.3> (Дата обращения 09.11.2022).
53. *Дворянский Л.В., Измайлов А.А.* Автоматический анализ дискретных динамических систем на метрических графах с помощью сетей Петри с временными дугами и инструмента TAPAAL // *Труды Института системного программирования РАН*. 2020. № 32(6). С. 155–166.
54. *Volovoi V.* Modelling of System Reliability Petri Nets with Aging Tokens // *Reliability Engineering & System Safety*. 2004. Vol. 84 (2). Pp. 149–161.
55. *Ломазова И.А.* Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. М.: Науч. мир, 2004. – 207 с.
56. *Ермакова В.О., Ломазова И.А.* Трансляция вложенных сетей Петри для верификации разверток // *Труды Института системного программирования РАН*. 2016. Т. 28. № 4. С. 115–136.
57. *Barros J.P., Gomes L.* From non-autonomous Petri net models to executable state machines // *Proceedings of 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vancouver, Canada. 2019. Pp. 1638–1643.
58. IOPT Tools [Электронный ресурс]. – URL: <http://gres.uninova.pt/IOPT-Tools-V1.1/> (Дата обращения 10.10.2022).

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2022 г.

SIMULATION MODELS BASED ON PETRI NETS FOR THE ANALYSIS OF MAINTENANCE AND REPAIR PROCESSES OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

*S.P. Orlov, S.V. Susarev**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: orlovsp1946@gmail.com

Abstract. *The presented review analyzes the approaches and methods of using simulation models in the maintenance and repair organization of the complex technical objects and systems. The development of the concept of "Industry 4.0" and the Internet of things involves the transition from periodic and preventive maintenance to predictive maintenance based on the study of processes during the object operation. It is shown that system models based on Petri nets are convenient for describing and analyzing technological processes and equipment maintenance. The effectiveness of timed stochastic colored Petri nets for virtual tests in the design of maintenance and repair procedures in complex systems is revealed. The use of hierarchical Petri nets allows building complex models that describe interrelated processes. A general model based on a hierarchical network is proposed to study the processes of deterioration and degradation of the technical object aggregates and elements and to form a predictive maintenance strategy. The model includes a Gantt chart of production tasks, a set of active and reserve units, maintenance and repair modules. The examples of simulation models on Petri nets for various technical systems are considered. Solutions for flexible production systems, railway bridges, offshore wind turbines, an aircraft fleet, a group of robotic vehicles, and a complex of computer equipment of an enterprise are given. The models of various maintenance strategies are considered and the generality of the models based on hierarchical Petri nets is shown. The article formulates methodological principles for constructing hierarchical networks to simulate the operation and maintenance of technical systems. The article analyzes known software tools for the implementation of timed stochastic colored Petri nets. The summary concludes that the use of simulation models on Petri nets is promising for organizing maintenance and repair of complex technical objects and systems.*

Keywords: *system analysis, cyber-physical systems, predictive maintenance, cannibalization maintenance strategy, virtual testing, simulation, hierarchical nets, timed colored Petri nets*

REFERENCES

1. Lee E.A., Seshia S.A. Introduction to embedded systems, A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edn. The MIT Press, USA, 2017.
2. Chachada A. et al. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture // Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, Italy. IEEE Xplore, 2018.
3. Sang G.M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F. Predictive Maintenance in Industry 4.0 // Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020), Lecce, Italy. 2020.
4. Shcherbakov M.V., Sai Van K. Arkhitektura sistemy predskazatel'nogo tekhnicheskogo obsluzhivaniia slozhnykh mnogoobiektnykh sistem v kontseptsii Industrii 4.0 // Programmnye produkty i sistemy. 2020. No. 2. Pp. 186–194.

* *Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

Sergey V. Susarev, (PhD (Techn.)), Associate Professor.

5. *Novak P., Kadera P., Wimmer M.* Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.
6. *Stiß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Klodowski A., Bär T., Diedrich C.* Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems // Proceedings of 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin. 2016. Pp. 1–9.
7. *Peterson J.L.* Teoriia setei Petri i modelirovanie sistem. M., Mir, 1984. 264 p.
8. *Kotov V.E.* Seti Petri. M., Nauka, 1984. 160 p.
9. *Wang J.* Time Petri Nets. In: Timed Petri Nets. The Kluwer International Series on Discrete Event Dynamic Systems. Boston, MA: Springer, 1998. Vol. 9.
10. *Jensen K., Kristensen M.* Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. 382 p.
11. *Santos F.P., Teixeira A.P., Soares C.G.* Modeling, simulation and optimization of maintenance cost aspects on multi-unit systems by stochastic Petri nets with predicates // Simulation. 2018. Vol. 95. Pp. 461–478.
12. *Marsan M.A.* Stochastic Petri nets: An elementary introduction // In: Advances in Petri Nets 1989. Lecture Notes in Computer Science, vol 424. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990.
13. *Lu Z.* System Maintainability Modeling Method Based on Colored Stochastic Time Petri Net // Journal of Mechanical Engineering. 2011. Vol. 47. Pp. 185–192.
14. *Lu Z., Liu J., Dong L., Liang X.* Maintenance Process Simulation Based Maintainability Evaluation by Using Stochastic Colored Petri Net // Appl. Sci. 2019. Vol. 9, 3262.
15. *Yang S.K., Liu T.S.* A Petri net approach to early failure detection and isolation for preventive maintenance // Quality and Reliability Engineering International. 1998. Vol. 14. Pp. 319–330.
16. *Hamroun A., Labadi K., Lazri M.* Modelling and Performance Analysis of Electric Car-Sharing Systems Using Petri Nets // Proceedings of E3S Web Conference. 2020. Vol. 170, 03001.
17. *Ferreira C., Neves L.C., Silva A., De Brito J.* Stochastic maintenance models for ceramic claddings // Structure and Infrastructure Engineering. 2019. Vol. 16. Pp. 1–19.
18. *Kucera E., Haffner O., Drahoš P., Leskovský R., Cigánek J.* PetriNet Editor + PetriNet Engine: New Software Tool // Appl. Sci. 2020. Vol. 10, 7662.
19. *Chahrouh N., Nasr M., Tacnet J.-M., Bèrenghuer C.* Deterioration modeling and maintenance assessment using physics-informed stochastic Petri nets: Application to torrent protection structures // Reliability Engineering and System Safety. 2021. Vol. 210, 107524.
20. *Lorbeer J.-U., Padberg J.* Hierarchical, Reconfigurable Petri Nets // Workshops at Modelierung 2018, Petri Nets and Modeling 2018 (PeMod18). Hamburg, Germany: Hamburg University of Applied Sciences. 2018. Vol. 2060. Pp. 167–186.
21. *Orlov S.P., Susarev S.V., Uchaikin R.A.* Application of Hierarchical Colored Petri Nets for Technological Facilities' Maintenance Process Evaluation // Appl. Sci. 2021. Vol. 11, 5100.
22. *Uchaikin R.A., Orlov S.P.* Zadacha raspredeleniia sredstv vychislitelnoi tekhniki na mashinostroitelnom predpriatii // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2019. Vol. 27, no. 4. Pp. 84–98.
23. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets]. <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (accessed September 20, 2022).
24. *Barros T.C., De Figueiredo J.C., Perkusich A.* A Fault Tolerant Colored Petri Net Model for Flexible Manufacturing Systems // J. Braz. Comput. Soc. 1997. Vol. 4(2).
25. *Wang L.-C., Wu S.-Y.* Modeling with colored timed object-oriented Petri nets for automated manufacturing systems // Computers & Industrial Engineering. 1998. Vol. 34 (2). Pp. 463–480.
26. *Yan H.-S., Wang N.-S., Zhang J.-G., Cui X.-Y.* Modelling, scheduling and simulation of flexible manufacturing systems using extended stochastic high-level evaluation Petri nets // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 1998. Vol. 14(2). Pp. 121–140.
27. *Riascos L.A.M., Moscato L.A., Miyagi P.* Detection and treatment of faults in manufacturing systems based on Petri Nets // J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2004. Vol. 26. Pp. 280–289.
28. *Kahraman C., Tiysüz F.* Manufacturing System Modeling Using Petri Nets // Computational Intelligence. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer Science and Business Media LLC. 2010. Vol. 252. Pp. 95–124.

29. Guo Z., Zhang Y., Zhao X., Song X. A Timed Colored Petri Net Simulation-Based Self-Adaptive Collaboration Method for Production-Logistics Systems // *Appl. Sci.* 2017. Vol. 7, 235.
30. Le B., Andrews J. Petri net modelling of bridge asset management using maintenance-related state conditions // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2016. Vol. 12. Issue 6. Pp. 730–751.
31. Yianni P.C., Rama D., Neves L.C., Andrews J.D. Railway bridge asset management using a Petri-Net modelling approach // *Life-Cycle of Engineering Systems. Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure*. London, UK: CRC Press, 2016. Pp. 1964–1971.
32. Le B., Andrews J., Fecarotti C. A Petri net model for railway bridge maintenance // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2017. Vol. 231(3). Pp. 306–323.
33. Fecarotti C., Andrews J. A Petri net approach to assess the effects of railway maintenance on track availability // *Infrastructure Asset Management*. 2020. Vol. 7. Issue 3. Pp. 201–220.
34. Le B., Andrews J. Modelling wind turbine degradation and maintenance // *Wind Energy*. 2016. Vol. 19. Pp. 571–591.
35. Leigh J.M., Dunnett S.J. Use of Petri Nets to Model the Maintenance of Wind Turbines // *Qual. Reliab. Eng. Int.* 2014. Vol. 32. Pp. 167–180.
36. Yan R., Dunnett S. Improving the Strategy of Maintaining Offshore Wind Turbines through Petri Net Modelling // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, 574.
37. Bulavskii P.E., Vaisov O.K., Bystrov I.N. Modelirovanie i otsenka vremeni poiska i ustraneniia otkazov sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki s pomoshchiu setei Petri // *Avtomatika na transporte*. 2019. Vol. 5. No. 4. Pp. 478–492.
38. Eisenberger D., Fink O. Assessment of maintenance strategies for railway vehicles using Petri-nets // *Transp. Res. Procedia*. 2017. Vol. 27. Pp. 205–214.
39. Volovoi V. Abridged Petri Nets. 2013. arXiv: 1312.2865v1 [cs.OH] 10 Dec 2013. 32 p. https://www.academia.edu/27965562/Abridged_Petri_Nets (accessed November 10, 2022)
40. Volovoi V. Building business cases for risk and reliability technologies // *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems ESREL*. 2015. Pp. 1769–1777.
41. Sheng J., Prescott D. A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalisation // *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. Vol. 168. Pp. 290–305.
42. Sheng J., Prescott D. A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 189. Pp. 67–88.
43. Fisher W.W. Issues and Models in Maintenance Systems Incorporating Cannibalization: A Review // *Information Systems and Operational Research*. 1990. Vol. 28(1). Pp. 154–164.
44. Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya. Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399 (044032).
45. Orlov S.P., Bizyukova E.E., Yakovleva A.E. Virtualnye ispytaniia agregatov dlia virtualnogo vvoda v proizvodstvo robotizirovannogo avtomobilia // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki*. 2021. Vol. 29. No. 1. Pp. 46–57.
46. Susarev S.V., Orlov S.P., Bizyukova E.E., Uchaikin R.A. Primenenie modelei na setiakh Petri pri organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniia avtonomnykh agrotekhnicheskikh transportnykh sredstv // *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gos. tekhnolog. instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 2021. No. 58(84). Pp. 98–104.
47. Volkhonskaia E.E., Orlov S.P. Digital twins on Petri nets for virtual testing of robotic vehicles // *Innovatsionnoe razvitie sovremennoi nauki teoriia metodologiiia praktika: sb. statei VI Vseross. nauchno-prakt. konferentsii. Petrozavodsk, MCNP “New Science”, 2022*. Pp. 15–21.
48. Orlov S.P., Uchaikin R.A. Modeli na raskrashennykh setiakh Petri dlia upravleniia tekhnicheskim obsluzhivaniem kompiuternogo oborudovaniia predpriiatiia // *Prom-Inzhiniring. Trudy VII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2021. Chelyabinsk, 2021. Pp. 263–269.
49. Uchaikin R.A. Metodika podderzhki priiniatiia reshenii pri upravlenii kompleksom sredstv vychislitelnoi tekhniki nauchno-proizvodstvennogo predpriiatiia na osnove geterogennykh sistemnykh modelei. Diss. ... kand. tech. nauk. Samara, SamGTU, 2022. 158 p.
50. Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Modelirovanie telekommunikatsionnykh sistem v CPN Tools: uchebnoe posobie. Odessa, Odessa National Academy of Communications, 2006. 60 p.
51. Petri Net Toolbox. https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/petri-net-toolbox.html (accessed November 09, 2022).
52. TAPAAL: Tool for Verification of Timed-Arc Petri Nets. <https://www.tapaal.net/news/tapaal-3.9.3> (accessed November 09, 2022).

53. *Dvorianskii L.V., Izmailov A.A.* Avtomaticheskii analiz diskretnykh dinamicheskikh sistem na metricheskikh grafakh s pomoshchiu setei Petri s vremennymi dugami i instrumenta TAPAAL // Trudy Instituta sistemnogo programirovaniia RAN. 2020. Vol. 32(6). Pp. 155–166.
54. *Volovoi V.* Modelling of System Reliability Petri Nets with Aging Tokens // Reliability Engineering & System Safety. 2004. Vol. 84(2). Pp. 149–161.
55. *Lomazova I.A.* Vlozhennye seti Petri: Modelirovanie i Analiz raspredelennykh sistem s obiektnoi strukturoi. M.: Nauchnyi Mir, 2004. 207 p.
56. *Ermakova V.O., Lomazova I.A.* Translyatsiia vlozhennykh setei Petri dlia verifikatsii razvertok // Trudy Instituta sistemnogo programirovaniia RAN. 2016. Vol. 28. No. 4. Pp. 115–136.
57. *Barros J.P., Gomes L.* From non-autonomous Petri net models to executable state machines // Proceedings of 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Vancouver, Canada. 2019. Pp. 1638–1643.
58. IOPT Tools. <http://gres.uninova.pt/IOPT-Tools-V1.1/> (accessed October 10, 2022).

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

УДК 621.45.038.74

РАЗРАБОТКА АКТИВНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ В УСЛОВИЯХ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ¹

*Н.С. Альдебенев, И.Р. Тонеев, Е.С. Журавлева, Д.А. Деморецкий**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: nikaldy@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается проблема создания теплозащитного покрытия для информационно-измерительных приборов и систем различного назначения, подвергающихся внешнему высокотемпературному воздействию в условиях аварийных ситуаций, связанных с пожаром. В качестве решения проблемы предлагается использование теплозащитных материалов, содержащих активные добавки, которые обеспечивают теплозащитный эффект, способствующий преломлению тепловых потоков, направленных на нагрев защищаемого объекта. Теплозащитный эффект обеспечивается эндотермической реакцией, которая происходит в материале, когда достигается температура разложения выбранного компонента. Следует отметить, что температура, при которой должна происходить реакция с поглощением тепла, должна быть ниже температуры поражения защищаемого объекта. В таком случае тепловые потоки, проходящие через слой теплозащитного материала, будут преломляться, так как тепло будет затрачиваться на разложение эндотермического наполнителя. Прогрев материала будет осуществляться за счет матрицы материала и продуктов разложения. Исходя из задач, для выполнения которых необходимо применение теплозащитного материала, определяется количе-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

* Альдебенев Николай Сергеевич, инженер НИС кафедры «Технология твердых химических веществ», аспирант.

Тонеев Иван Романович, младший научный сотрудник НИС кафедры «Технология твердых химических веществ», преподаватель кафедры «Химическая технология полимерных и композиционных материалов».

Журавлева Елена Сергеевна, младший научный сотрудник НИС кафедры «Технология твердых химических веществ», аспирант.

Деморецкий Дмитрий Анатольевич, заведующий кафедрой «Технология твердых химических веществ», доктор технических наук, профессор.

ство эндотермического наполнителя. Соответственно, с увеличением промежутка времени, в течение которого необходимо ликвидировать пожар, содержание эндотермического наполнителя также увеличивается. Применение теплозащитного материала актуально для аварийных регистраторов полетных данных, так как при авиакатастрофе с высокой вероятностью возможно возникновение пожара, который может привести к потере информации, необходимой для определения причин аварийной ситуации.

Ключевые слова: теплозащитное покрытие, бортовой самописец, эндотермическая реакция, теплопроводность, испытательный стенд, газовая горелка, пламя, термопара

Введение

Проблема создания эффективного теплозащитного покрытия (ТЗП) актуальна для широкого спектра применений. На сегодняшний день это необходимо как для космических аппаратов и бортовых самописцев, так и для контейнеров, сейфов и других конструкций, защищающих различные объекты от воздействия высокотемпературного нагрева [1–5]. Исходными данными для разработки ТЗП являются условия, при которых оно должно выполнять свою функцию. От этого зависит, на каких принципах будет осуществляться разработка ТЗП и какие теплофизические свойства ТЗП необходимы для выполнения им поставленной задачи [6–10].

В статье рассматривается экспериментальное исследование свойств теплозащитного покрытия на примере макета, моделирующего конструкцию защитного контейнера или сейфа, на внутренней стенке которого размещено ТЗП. В качестве теплозащитного покрытия были взяты образцы с различными составами.

Дифференциальный термический анализ

Для определения способности компонентов разлагаться с поглощением тепла был проведен дифференциальный термический анализ [11–13]. В качестве эндотермической добавки для составов теплозащитных покрытий был выбран гептагидрат сульфата магния $MgSO_4 \cdot 7H_2O$.

Для опытов были отобраны навески исследуемых веществ в количестве 50 мг. Для определения эндотермического эффекта вещества в пробирки с исследуемыми веществами устанавливались термопары прибора. Далее производили нагрев пробирок до наблюдения отклонения температуры в веществе от температуры нагрева. Эксперимент останавливался, когда температура в веществе начинала соответствовать температуре нагрева (то есть эндотермическое разложение вещества было закончено). Данные экспериментов фиксировали на графиках с помощью программного обеспечения прибора ДТА. По оси ординат отложена разница температур в веществе и на нагреваемой поверхности. По оси абсцисс отложены значения фактической температуры, которая росла со скоростью 5 °С/мин.

График изменения температуры в объеме эндотермически активного компонента во время сбора данных показан на рис. 1. Процедура проводилась в соответствии с ГОСТ 33403-2015 [14].

Из рис. 1 видно, что при нагревании до 112,5 °С температура в объеме компонента начинает отклоняться; таким образом, начинается реакция разложения вещества с поглощением выделяемого тепла. Реакция заканчивается при температуре воздействия, соответствующей 130 °С. Данный процесс описывается химическим уравнением эндотермического разложения гептагидрата сульфата магния:



при этом гептагидрат сульфата магния разлагается с выделением воды и сульфата

магния.

Максимальный эндотермический эффект (отклонение температуры в веществе от температуры нагрева) наблюдается при 120 °С (разница температуры в исследуемом веществе и температуры нагрева составила 6,8 °С).

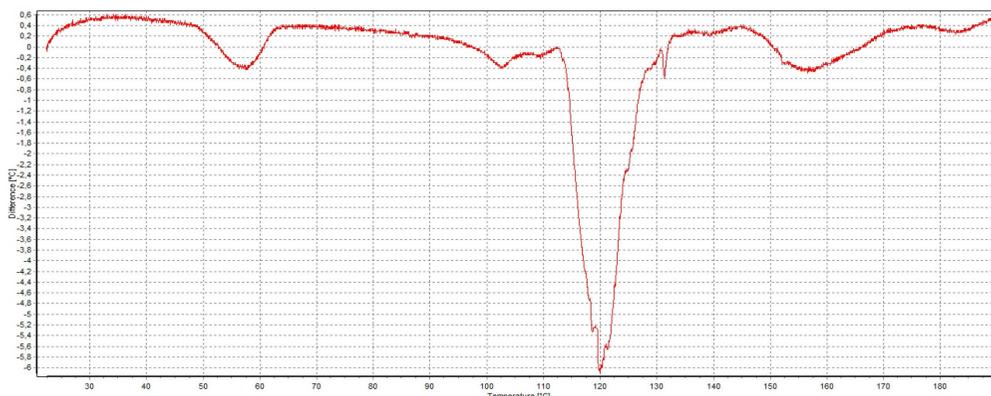


Рис. 1. Дифференциальный термический анализ эндотермического компонента для ТЗП

Тепловой эффект химической реакции определили по тому же принципу, что и для разложения хлорида аммония. В табл. 1 представлены энтальпии образования веществ.

Таблица 1

Энтальпии образования веществ

Вещество	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	MgSO_4	H_2O
Энтальпия образования ΔH^0 , кДж/моль	-3384	-1288,8	-285,33

Тепловой эффект химической реакции разложения 1 моля хлорида аммония составляет $\Delta H^0_{\text{реакции}} = (-1288,8 + 7(-285,33)) - 3384 = 97,89$ кДж (для разложения 1 моля гептагидрата сульфата магния необходимо затратить 97,89 кДж тепла).

Например, кремниевые транзисторы начнут разрушаться при температуре (120...150) °С. Соответственно, пока в объеме теплозащитного материала будет происходить описанная эндотермическая реакция, прибор будет продолжать свое функционирование.

Экспериментальная оценка эффективности эндотермической добавки

Компонент, с которым проводился ДТА, использовался в качестве эндотермического наполнителя для изготовления образцов ТЗП. В процессе исследования были протестированы три образца ТЗП, рецептуры которых представлены в табл. 2.

Полученные образцы были использованы в макете (рис. 2).

Элемент *a* или теплоизоляционный материал необходим для предотвращения потери тепла во время эксперимента. Для определения теплофизических свойств выбранных образцов ТЗП на макете термопары типа *K* были установлены на нагретой поверхности элемента *e*, между элементами *d* и *e*, *c* и *d*, а также

между элементами b и c [15–17]. Внешний вид элементов макета и процесс сборки представлены на рис. 3 и 4.

Таблица 2

Рецептуры испытуемых образцов

Рецептура № 1	Связующее (35 %) + инертный наполнитель (65 %)
Рецептура № 2	Связующее (35 %) + полые микросферы (65 %) Воздушные включения составляют 50 % объема образца
Рецептура № 3	Связующее (35 %) + эндотермический наполнитель (65 %)
Рецептура № 4	Связующее (30 %) + эндотермический наполнитель (70 %)

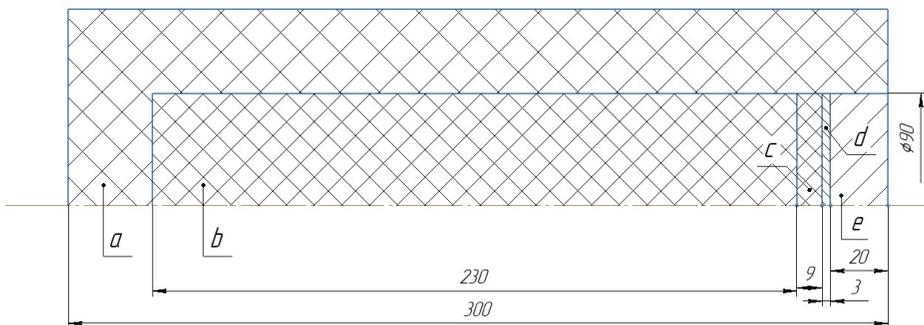


Рис. 2. Схема компоновки, моделирующая конструкцию сейфа либо защитного контейнера: a – теплоизоляционный материал; b – защищаемый объект; c – образец теплозащитного покрытия; d – имитация внутренней металлической оболочки сейфа; e – имитация внешней металлической оболочки сейфа

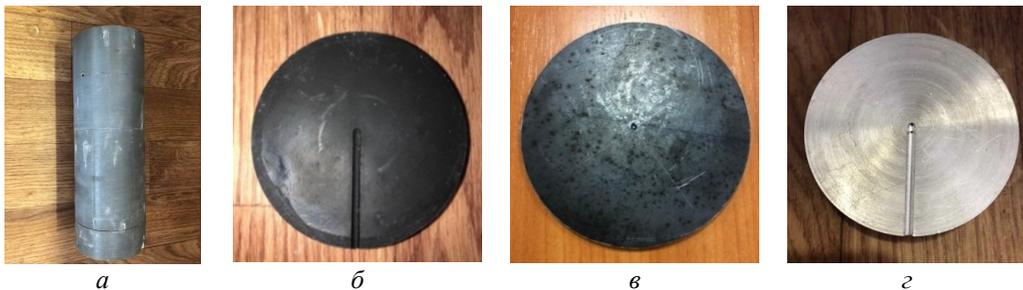


Рис. 3. Элементы макета: a – защищаемый объект; b – образец теплозащитного покрытия; c – имитация внутренней металлической оболочки; d – имитация наружной металлической оболочки



Рис. 4. Процесс сборки макета

После сборки макет устанавливается на испытательный стенд (рис. 5).

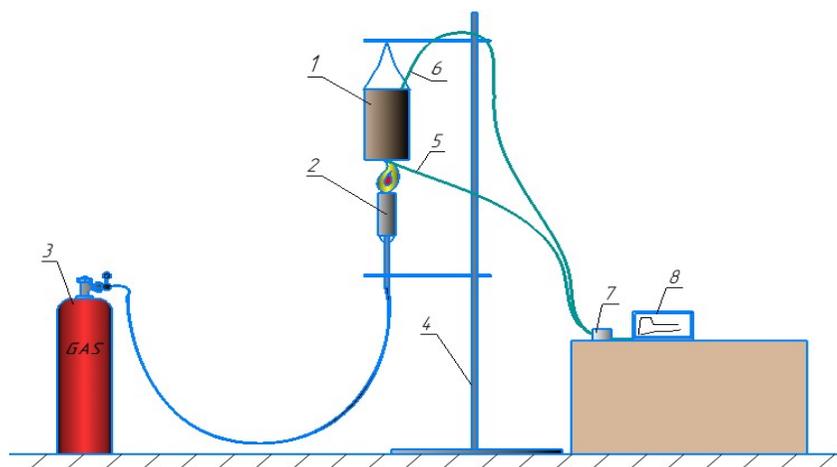


Рис. 5. Схема проведения эксперимента на испытательном стенде:
 1 – макет; 2 – газовая горелка; 3 – газовый баллон; 4 – штатив;
 5 – термопара; 6 – термопара; 7 – аналого-цифровой преобразователь;
 8 – компьютер

Были проведены эксперименты с целью определить, сколько времени требуется для того, чтобы температура в зоне между защищаемым объектом *b* и образцом теплозащитного материала *c* достигла температуры $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ при воздействии на внешнюю оболочку «е» пламени горелки. При этом температура на нагретой поверхности поддерживалась в диапазоне $(800\dots 1000)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, в постановке эксперимента рассматривается одна из многочисленных задач, связанных с разработкой теплозащитных материалов.

В результате экспериментов были получены диаграммы изменения температур в макете, изображенные на рис. 6–9.

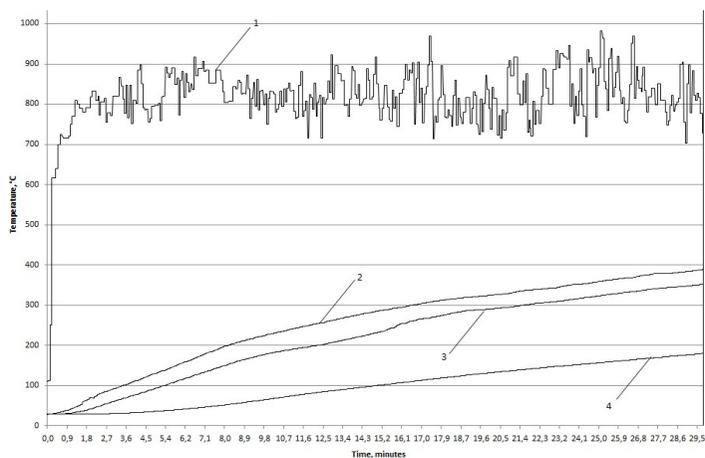


Рис. 6. График изменения температур в макете с образцом № 1: 1 – температура в зоне нагрева; 2 – температура между внешней и внутренней оболочками; 3 – температура между внутренней оболочкой и образцом ТЗП; 4 – температура между образцом ТЗП и защищаемым объектом

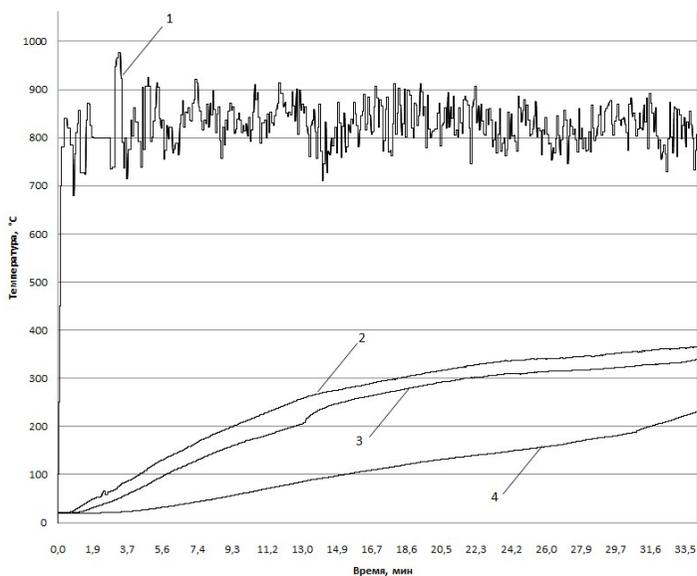


Рис. 7. График изменения температур в макете с образцом № 2: 1 – температура в зоне нагрева; 2 – температура между внешней и внутренней оболочками; 3 – температура между внутренней оболочкой и образцом ТЗП; 4 – температура между образцом ТЗП и защищаемым объектом

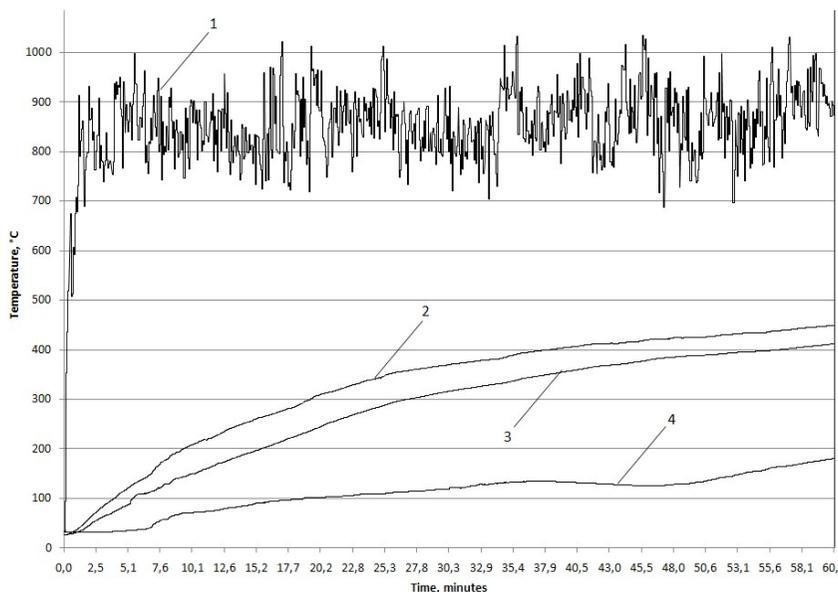


Рис. 8. График изменения температур в макете с образцом № 3:
 1 – температура в зоне нагрева; 2 – температура между внешней и внутренней оболочками; 3 – температура между внутренней оболочкой и образцом ТЗП; 4 – температура между образцом ТЗП и защищаемым объектом

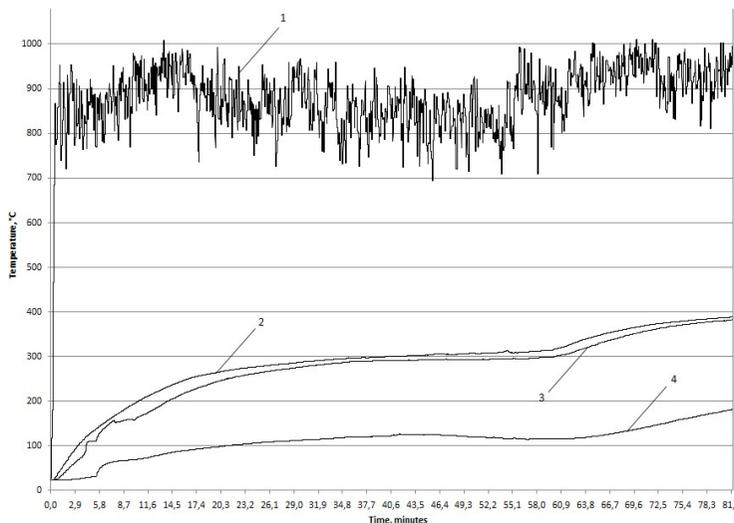


Рис. 9. График изменения температур в макете с образцом № 4:
 1 – температура в зоне нагрева; 2 – температура между внешней и внутренней оболочками; 3 – температура между внутренней оболочкой и образцом ТЗП; 4 – температура между образцом ТЗП и защищаемым объектом

Так как наибольший интерес вызывает процесс изменения температуры в зоне между образцом ТЗП и защищаемым объектом, графики изменения температуры в указанной зоне сведены в общую диаграмму, на которой наблюдается различие в динамике роста температуры. Диаграмма представлена на рис. 10.

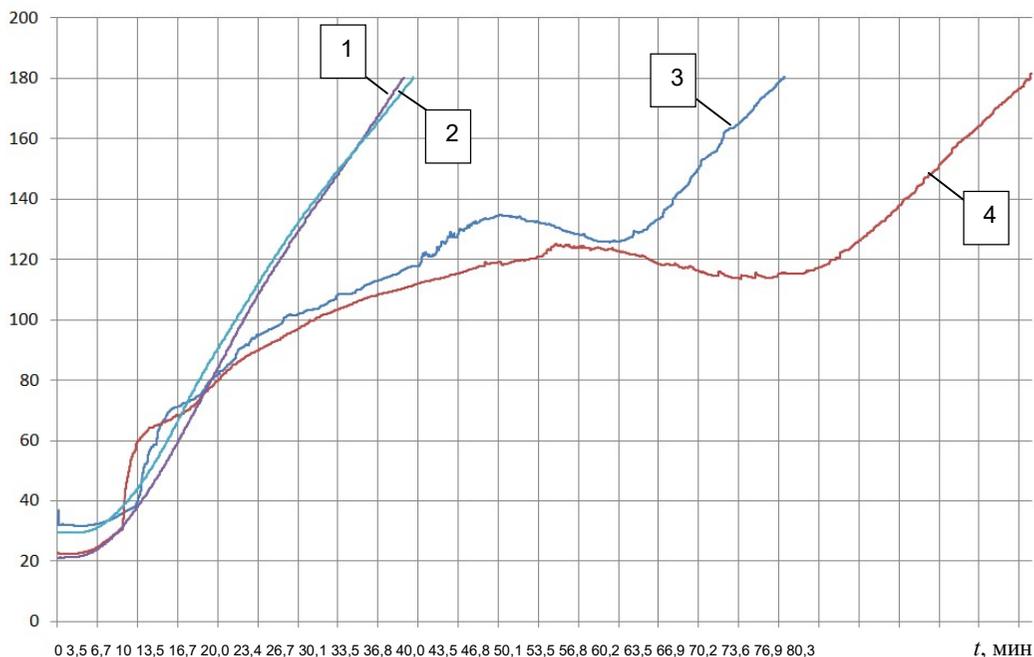


Рис. 10. Диаграмма изменения температуры за образцами ТЗП во время нагрева макета: 1 – график изменения температуры за образцом № 1; 2 – график изменения температуры за образцом № 2; 3 – график изменения температуры за образцом № 3; 4 – график изменения температуры за образцом № 4

Из графиков, показанных на рис. 10, видно, что образец № 1, который не содержит эндотермического компонента, показал самое короткое время экспозиции. Не дал особого прироста по времени прогрева и внедрение в образец № 2 высокопористого наполнителя. Следует отметить, что во время экспериментов с образцами № 1 и № 2 температура на границе ТЗП – защищаемый объект росла линейно. Самое длительное время нагрева до температуры 180 °С между защищаемым объектом и образцом ТЗП наблюдается в эксперименте с образцом № 4, поскольку рецептура содержит наибольшее количество эндотермического наполнителя.

Выводы

Проведенные исследования доказывают, что наличие эндотермического наполнителя в составе рецептуры ТЗП позволяет значительно увеличить теплоемкость изолирующего слоя, поскольку повышаются его теплопоглощающие характеристики. Экспериментально подтверждено, что наличие эндотермического наполнителя в составе ТЗП позволяет повысить его эффективность на 100 %. Кроме того, увеличение содержания эндотермического наполнителя в составе ТЗП также способствует увеличению его эффективности. Разработанный теплозащитный материал рекомендуется для применения в составе бортовых самописцев, в шкафах управления электрооборудованием, сейфах, защитных контейнерах и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Охапкин А.С.* Исследование характеристик теплопередачи термозащитных композиционных материалов // Журнал инженерной физики и теплофизики. 1985. Т. 49, 6. С. 1469–1473.
2. *Алифанов О.М., Черепанов В.В.* Идентификация моделей и прогнозирование физических свойств высокопористых теплозащитных материалов // Журнал инженерной физики и теплофизики. 2010. Т. 83. С. 770–782.
3. *Алифанов О.М., Будник С.А., Ненарокомов А.В., Нетелев А.В., Титов Д.М.* Определение тепловых свойств разрушающихся материалов с применением для испытаний конструкций космических аппаратов // 61-й Международный астронавтический конгресс (МАК-10) (Прага, Чешская Республика). 2010. С. 10.
4. *Dec J.A., Braun R.D., Lamb B.* Анализ абляционного теплового отклика с использованием метода конечных элементов // Журнал теплофизики и теплопередачи. 2012. Т. 26, 2. С. 201–212.
5. *Резник С.В., Просунцов П.В., Михайловский К.В.* Прогнозирование теплофизических и термомеханических характеристик пористых углерод-керамических композиционных материалов теплозащитного экрана аэрокосмических аппаратов // Журнал инженерной физики и теплофизики. 2015. Т. 88, 3. С. 594–601.
6. *Крашенникова М.В.* Тенденции и перспективы разработки составов вспучивающихся огнезащитных покрытий для повышения пределов огнестойкости строительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 2(17). С. 36–39.
7. *Сипягина Н.А.* Новые композиционные материалы на основе керамических высокопористых теплозащитных материалов и аэрогелей // VIII конференция молодых ученых по общей и неорганической химии. 2018. С. 80.
8. *Бессарабов А.М., Емельянова О.Н., Степанова Т.И., Поляков А.В., Зайков Г.Е., Стоянов О.В.* Разработка нового поколения легких композиционных теплозащитных материалов на основе концепции *calc* // Вестник Казанского технологического университета. Т. 12(15). 2012. С. 83–88.
9. *Исаев А.У.* Материалы, применяемые в качестве теплозащитных и теплоизоляционных // Все материалы: Энциклопедический справочник. 2013. Т. 3. С. 7–11.
10. *Розененкова В.А., Миронова Н.А., Солнцев С.С., Гаврилов С.В.* Керамические покрытия для градиентных высокотемпературных теплозащитных материалов, стекла и керамики. 2013. Т. 1. С. 29–32.
11. *Шленский О.Ф., Шашков А.Г., Аксенов Л.Н.* Теплофизика распадающихся материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 144 с.
12. ГОСТ Р 53293-2009 Материалы, вещества и средства противопожарной защиты, идентификация методами термического анализа.
13. *Альмяшев В.И.* [и др.]. Комплексный термический анализ: учеб. пособие. СПб: Лемма, 2017. 193 с.
14. ГОСТ 33403-2015, Методы испытаний химических продуктов, опасных для окружающей среды, определение термической стабильности и сопротивления воздействию воздуха.
15. *El Wardi F.Z., Cherki A., Mounir S., Khabbazi A., Maaloufa Y.* Thermal characterization of a new multilayer building material based on clay, cork and cement mortar // Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. Energy Procedia. Vol. 157. 2019. Pp. 480–491.
16. *Yuki Kubotaa, Ousei Miyamoto, Takuya Aokia, Yuichi Ishidaa, Toshio Ogasawarac, Shin-jiro Umezub.* New thermal protection system using high-temperature carbon fiber-reinforced plastic sandwich panel // Acta Astronautica. Vol. 160. 2019. Pp. 519–526.
17. *Ying Lia, Lu Zhanga, Rujie Hea, Yongbin Mac, Keqiang Zhang, Xuejian Baia, Baosheng Xua, Yanfei Chena.* Integrated thermal protection system based on C/SiC composite corrugated core sandwich plane structure // Aerospace Science and Technology. Vol. 91. 2019.

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2022 г.

DEVELOPMENT OF ACTIVE HEAT-PROTECTIVE MATERIALS FOR INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS EXPERIENCING THERMAL LOADS IN EMERGENCY SITUATIONS

*N.S. Aldebenev, I.R. Toneev, E.S. Zhuravleva, D.A. Demoretsky**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: nikaldy@yandex.ru

Abstract. *The article deals with the problem of creating a t-protective coating for information-measuring devices and systems for various purposes exposed to external high-temperature exposure in emergency situations related to fire. As a solution to the problem, it is proposed to use thermal-protective materials containing active additives that provide a thermal-protective effect that promotes the refraction of heat flows aimed at heating the protected object. The heat-shielding effect is provided by an endothermic reaction that occurs in the material when the decomposition temperature of the selected component is reached. It should be noted that the temperature at which the reaction with heat absorption should occur should be lower than the temperature of the lesion of the protected object. In this case, the heat flows passing through the layer of heat-shielding material will be refracted, since heat will be spent on the decomposition of the endothermic filler. The heating of the material will be carried out due to the matrix of the material and decomposition products. Based on the tasks that require the use of a heat-protective material, the amount of endothermic filler is determined. Accordingly, with an increase in the time interval during which it is necessary to eliminate the fire, the content of endothermic filler also increases. The use of thermal-protective material is relevant for emergency flight data recorders, since in the event of a plane crash, a fire is likely to occur, which can lead to the loss of information necessary to determine the causes of an emergency.*

Keywords: *thermal-protective coating, flight recorder, formulations, endothermic reaction, thermal conductivity, test bench, gas burner, flame, thermocouple*

REFERENCES

1. *Okhapkin A.S.* Study of the heat-transfer characteristics of a thermally protective composite materials, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Vol. 49, 6(1985). 1469–1473.
2. *Alifanov O.M., Cherepanov V.V.* Identification of models and prediction of physical properties of highly porous heat-shielding materials, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Vol. 83 (2010). 770–782.
3. *Alifanov O.M., Budnik S.A., Nenarokomov A.V., Netelev A.V., Titov D.M.* Destructive Materials Thermal properties determination with application for spacecraft structures testing. The 61th International Astronautical Congress (IAC-10) (Prague, Czech Republic) (2010) 10.
4. *Dec J.A., Braun R.D., Lamb B.* Ablative thermal response analysis using the finite element method, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. Vol. 26, 2 (2012). 201–212.
5. *Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V.* Prediction of Thermophysical and Thermomechanical Characteristics of Porous Carbon-Ceramic Composite Materials of the Heat Shield of Aerospace Craft, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Vol. 88, 3 (2015). 594–601.
6. *Krashennikova M.V.* Trends and prospects of the development of compositions of distending fire protecting coatings for increase of limits of fire resistance of building constructions, *Fire and explosion safety*. Vol. 2(17) (2008). 36–39.

* *Nikolay S. Aldebenev, junior researcher.*
Ivan R. Toneev, junior researcher.
Elena S. Zhuravleva, junior researcher.
Dmitry A. Demoretsky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

7. *Sipyagina N.A.* New composite materials on the basis of ceramic high porous heatprotective materials and aerogels, The VIII conference of young scientists on general and inorganic chemistry, Moscow April. 10–13 (2018) 80.
8. *Bessarabov A.M., Emelyanova O.N., Stepanova T.I., Polyakov A.V., Zaikov G.E., Stoyanov O.V.* The development of the new generation of lightweight composite heat protective materials on the basis of the concept of calcs, Vestnik of the Kazan Techological University. Vol. 12(15) (2012). 83–88.
9. *Isaev A.U.* Materials applicated as heat protective and heat insulating ones, All the materials, Encyclopedic guide. Vol. 3 (2013). 7–11.
10. *Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Solntcev S.S., Gavrilov S.V.* Ceramic coatings for gradient high temperature heat protective materials, Glass and ceramics. Vol. 1 (2013). 29–32.
11. *Shlensky O.F., Shashkov A.G., Aksenov L.N.* Thermal physics of decaying materials, Moscow: Energoatomizdat, 1985, 144.
12. State standard R 53293-2009 Materials, substances, and fire protection means, Identification by the methods of the thermic analysis.
13. *Almyashev V.I.* [and others]. Comprehensive thermal analysis: tutorial, Saint-Petersburg: Publishing house Lemma, 2017, 193.
14. State standard 33403-2015, Test methods for chemical products that are hazardous to the environment, Determination of thermal stability and resistance to air.
15. *El Wardi F.Z., Cherki A., Mounir S., Khabbazi A., Maaloufa Y.* Thermal characterization of a new multilayer building materialbased on clay, cork and cement mortar, Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. Energy Procedia. Vol. 157 (2019). 480–491.
16. *Yuki Kubotaa, Ousei Miyamotob, Takuya Aokia, Yuichi Ishidaa, Toshio Ogasawarac, Shinjiro Umezub.* New thermal protection system using high-temperature carbon fibrereinforced plastic sandwich panel, Acta Astronautica. Vol. 160 (2019). 519–526.
17. *Ying Lia, Lu Zhanga, Rujie Hea, Yongbin Mac, Keqiang Zhang, Xuejian Baia, Baosheng Xua, Yanfei Chena.* Integrated thermal protection system based on C/SiC composite corrugated core sandwich plane structure, Aerospace Science and Technology. Vol. 91 (2019).

Энергетика и электротехника

УДК 621.365.511; 532.517.4

ЭЛЕКТРО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ КРЕМНИЯ

*А.А. Базаров, А.А. Навасардян**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы компьютерного моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов в электромагнитном кристаллизаторе расплава кремния периодического действия. Процесс кристаллизации протекает в условиях дополнительного подогрева вихревыми токами в расплаве. Основной задачей электромагнитного взаимодействия токов в расплаве и поля индуктора является создание отталкивающего усилия для исключения механического контакта кремния с поверхностью футеровки. При решении этой проблемы в расплаве происходит выделение тепла и формирование вектора сил, приводящих к перемешиванию жидкого кремния. Эти процессы сказываются на переносе тепла между нижней, верхней и боковой поверхностями цилиндра, форму которого принимает расплав. Для повышения качества кристаллической структуры слитка обеспечивается формирование градиента температуры с помощью управления тепловыми потоками за счет толщины стенок футеровки, подогрева верхней поверхности и отвода тепла от нижнего основания. Появление возмущающего воздействия в этих условиях способно нарушить баланс тепловых потоков и привести к созданию термонапряжений в слитке, сопровождающихся микротрещинами. Одновременное моделирование всех процессов, протекающих в электромагнитном кристаллизаторе кремния, в настоящее время на персональном компьютере нереализуемо.*

Целью работы является определение параметров электро- и гидродинамических процессов в расплаве для оценки влияния тепло- и массопереноса жидкого кремния на движение фронта кристаллизации.

При моделировании процесса гидродинамики в расплаве рассмотрено несколько вариантов геометрии, начиная от максимального объема жидкой фазы и заканчивая тонким верхним слоем в верхней части. При конической форме индуктора распределение вектора сил в расплаве зависит от осевой координаты, что приводит к значительному уменьшению составляющих скорости по мере снижения толщины жидкой фазы.

* Базаров Александр Александрович, доктор технических наук, доцент.
Навасардян Ашот Александрович, магистр.

Результаты исследования показали быстрое уменьшение эффекта перемешивания по мере уменьшения толщины жидкого слоя кремния при незначительном изменении общих показателей процесса кристаллизации.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, кристаллизация, кремний, метод конечных элементов, электромагнитные силы, гидродинамические процессы*

Введение

Кристаллизация кремния в электромагнитном кристаллизаторе позволяет получить слитки с гладкой и чистой поверхностью ввиду отсутствия контакта с внутренней поверхностью тигля [1–6]. Дополнительным эффектом при обеспечении низкой скорости кристаллизации является перемещение примесей из глубинных слоев столба расплавленного кремния на границу раздела твердой и жидкой фаз. Использование периодического режима работы способствует созданию приемлемых условий для данной технологии. Магнитное поле индуктора наводит токи в расплаве кремния, взаимодействие с которыми не только создает отталкивающие усилия, но и приводит к появлению движения расплава. Характер движения зависит от вязкости жидкости, величины и направления сил, от толщины слоя расплавленного кремния. По мере уменьшения слоя жидкости в процессе кристаллизации распределение скорости потоков значительно меняется. Для оценки влияния гидродинамических процессов в расплаве на процесс кристаллизации необходимо рассмотрение задачи расчета скорости движения жидкого кремния под воздействием электромагнитных сил.

Особенностью конструкции индуктора является коническая форма, наиболее подходящая для формирования заданного распределения отталкивающей силы в расплаве. Для создания слитка цилиндрической формы электромагнитная сила должна иметь максимальное значение в основании столба расплава и уменьшаться до нуля в верхней части. Дополнительно требуется смещение индуктора относительно загрузки ниже ее основания. Все это обеспечивает появление вертикальной составляющей сил в расплаве, что способствует появлению вихрей в жидкости.

С учетом сложности моделирования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в расплаве в условиях сильной неравномерности в распределении параметров задача может быть решена только при ограничении состава модели и сужении диапазона изменения свойств.

Задача проектирования электромагнитного кристаллизатора кремния представляет интерес ввиду необходимости совершенствования технологии производства кремния, пригодного для изготовления солнечных панелей. Известные технологии позволяют получить кремний необходимой степени очистки, но для широкого распространения требуется дальнейшее снижение стоимости производства. Одним из путей является уменьшение числа этапов производства. При использовании расплавленного кремния, полученного для нужд металлургии, в качестве исходного материала, загружаемого в электромагнитный кристаллизатор, возможно повышение степени очистки как за счет направленной кристаллизации, так и за счет дополнительного переноса примесей на поверхность при циркуляции расплава. В связи с этим дальнейшее совершенствование технологии производства и связанные с этим задачи являются актуальными.

Решение комплекса задач моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов в расплаве кремния представляет значительный интерес с точ-

ки зрения определения возможности повышения чистоты материала без существенного увеличения энергозатрат и использования существующей производственной технологии. Известно, что перемешивание способствует выравниванию химического состава в объеме и формированию более качественной кристаллической решетки в слитке [7, 8]. Для численной оценки влияния гидродинамических процессов желательно иметь подробную картину распределения потоков внутри расплава на разных этапах кристаллизации.

Движение жидкости от верхних слоев к нижним вносит изменения в перенос тепла. Проблемы моделирования в расплавах металлов нашли отражение в работах [9–16]. На тепловые процессы оказывают существенное влияние гидродинамические процессы, что связано с расчетом поля скоростей в расплаве. Распределение электромагнитных сил имеет существенную неравномерность по высоте и вдоль радиальной координаты. Для расплава кремния в процессе кристаллизации задача моделирования намного сложнее, так как постоянное движение фронта кристаллизации сопровождается значительным изменением электропроводности, теплопроводности и вязкости. В этих условиях решение связанной задачи поиска распределения электромагнитных сил и поля скоростей представляет серьезную проблему.

Гидродинамические процессы обусловлены не только создаваемой неравномерностью распределения электромагнитных сил по высоте расплава из-за увеличения твердой составляющей кремния, но и формой индуктора. Коническая форма способствует неравномерному распределению вертикальной составляющей электромагнитных сил, действующих в расплаве. Аналогично процессам в индукционных тигельных печах создаются условия для активного перемешивания. Для определения влияния гидродинамических процессов на фронт кристаллизации и длительность затвердевания требуются исследования при различных соотношениях высоты твердой и жидкой фазы загрузки.

Формулировка задачи

Кристаллизация расплава кремния в тигле происходит в условиях обжата электромагнитными силами. Индуктор имеет коническую форму и расположен немного ниже загрузки для формирования требуемого распределения отталкивающих усилий по высоте слитка, чтобы форма слитка имела вид цилиндра (рис. 1). Сложный вид распределения электромагнитных сил, действующих внутри расплава, требует совместного решения электромагнитной задачи и задачи гидродинамики. В соответствии с принятым алгоритмом процесса кристаллизации фронт кристаллизации движется от основания слитка к его верхней поверхности. В ходе процесса кристаллизации толщина верхнего (жидкого) слоя уменьшается. Необходимо проанализировать распределение скорости в расплаве в отдельные моменты времени, чтобы оценить влияние тепло- и массопереноса на градиент температуры по высоте и фронт кристаллизации в расплаве.

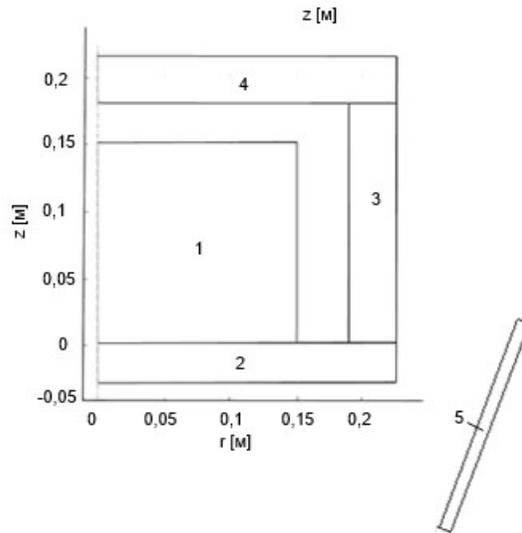


Рис. 1. Геометрическая модель электромагнитного кристаллизатора кремния: 1 – расплав кремния; 2 – подложка; 3 – боковая стенка тигля; 4 – крышка тигля; 5 – индуктор

Электромагнитная задача

Определение электродинамических усилий при кристаллизации рассмотрено во многих работах, посвященных электромагнитным кристаллизаторам. Общий подход к задачам электродинамики при индукционном нагреве показан в работах [9–11]. В терминах векторного магнитного потенциала задача формулируется следующим образом:

$$\nabla^2 \{\bar{A}\} - j\omega\sigma \{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0. \quad (1)$$

Уравнение Пуассона (1) дополняется граничными условиями Дирихле и Неймана на различных участках границы:

$$\{\bar{A}\} = 0 \text{ на } S_1; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial n} = 0 \text{ на } S_2. \quad (3)$$

Выражение (2) задает значение потенциала, а значит, и напряженности, на удаленной границе области. Выражение (3) описывает поведение функции на линии или поверхности, отражающей условия симметрии.

Выражение (1) имеет линейный вид ввиду отсутствия ферромагнитных материалов. Это упрощает условия задачи.

Решение краевой задачи расчета магнитного поля в изотропной среде (1)–(3) эквивалентно минимизации энергетического функционала:

$$F = \int_V \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial z} \right] dx dy dz + \int_V j\omega\sigma |\bar{A}|^2 dx dy dz + \int_V \{\bar{J}\} \{\bar{A}\} dx dy dz. \quad (4)$$

Сущность метода, основанного на МКЭ, заключается в исследовании гло-

бальной функции процесса, в данном случае векторного потенциала $\{\bar{A}\}$, в дискретных частях анализируемой области V , которая должна быть предварительно разбита на конечные смежные подобласти (конечные элементы), что позволяет свести задачу с бесконечным числом степеней свободы к задаче, содержащей конечное число параметров. При этом внутри подобластей искомая функция интерполируется степенными полиномами, сшивается на границах контакта элементов и при условии малости геометрических размеров последних (число элементов стремится к бесконечности) оказывается решением уравнений в частных производных типа (1)–(3). В качестве интерполирующих полиномов конечных элементов треугольного вида на плоскости (x, y) использованы линейные функции.

После преобразований выражений, построенных на базе (4), получаем систему алгебраических уравнений:

$$\{[K] + j[Q]\} \cdot \{\bar{A}\} + \{\bar{R}\} = 0. \quad (5)$$

Здесь: $[K]$ и $[Q]$ – активная и реактивная составляющие матрицы жесткости (проводимости); $\{\bar{R}\}$ – вектор источников.

Решение данной задачи осуществляется итерационным методом. По найденным значениям вычисляются значения индукции, напряженностей электрического и магнитного полей, токов.

В проводящих средах электромагнитная индукция во взаимодействии с током создает распределенную по области проводника силу Лоренца

$$F = J \times B. \quad (6)$$

Между индуктором и нагрузкой всегда имеются отталкивающие силы, направленные согласно или встречно с радиальной координатой. Вторая составляющая силы, действующей на нагрузку, направлена вдоль оси индуктора и является выталкивающей.

Усилие согласно выражению (6) пропорционально величине тока. Значение мощности тепловыделения также зависит от тока, но еще и от напряжения. Напряжение на индукторе зависит от частоты. Поэтому можно подобрать параметры индуктора и источника питания, при которых сила будет достаточной для удержания металла на требуемом расстоянии от футеровки, а мощность при этом будет меньше потерь в окружающую среду. Таким образом, процесс кристаллизации будет протекать беспрепятственно. Суммарный тепловой поток охлаждения с боковой поверхности металла излучением к футеровке и далее к индуктору и с нижней поверхности через основание формы к охладителю должен превышать мощность индуктора.

Гидродинамические процессы в расплаве кремния

Для определения вида движения жидкости используется критерий Рейнольдса, характеризующий гидродинамический режим и являющийся мерой отношения сил инерции и внутреннего трения в потоке:

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} = \frac{wd}{\nu}, \quad (7)$$

где w – средняя скорость потока, м/с; d – характерный размер (диаметр слитка), м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

При числе Рейнольдса меньше критического, равного 2200, вдоль поверхности боковой стенки слитка образуется тонкий ламинарный пограничный слой. Если же число Рейнольдса больше критического значения, то на начальном участке возле стенки, как и в первом случае, образуется ламинарный пограничный слой, но вблизи этого слоя на некотором расстоянии от основания создается турбулентный слой, который, постепенно утолщаясь, заполняет весь объем области расплава.

Критическому числу Рейнольдса соответствует критическая скорость течения жидкости в цилиндрической области диаметром d :

$$w_{kr} = 2200 \cdot \nu / d . \quad (8)$$

Имеется различие изменения скорости течения жидкости в поперечном сечении при ламинарном и турбулентном режимах. При ламинарном режиме скорость изменяется по закону параболы, а отношение средней скорости к максимальной равно $w_{sr} / w_0 = 0,5$. При турбулентном режиме кривая изменения скорости имеет вид усеченной параболы, а отношение средней скорости к максимальной является функцией числа Рейнольдса. В диапазоне чисел Re от 10^4 до 10^8 это отношение изменяется в довольно узких пределах – от 0,8 до 0,9 [17].

Указанный выше характер распределения скоростей по сечению справедлив только для так называемого гидродинамически стабилизированного движения жидкости, стабилизация же наступает не сразу, а на некотором расстоянии x от начала потока. Длина участка гидродинамической стабилизации для ламинарного режима может приниматься равной $x = 0,03 \cdot d \cdot \text{Re}$, а для турбулентного режима $x = (25 \div 40) \cdot d$.

При турбулентном режиме движения у стенки всегда имеется слой, в котором жидкость движется, не перемешиваясь (так называемый ламинарный пограничный слой).

По абсолютному значению толщина ламинарного пограничного слоя весьма невелика. Например, при $\text{Re} = 10^4$ толщина $\delta = d / 466$, при $\text{Re} = 10^5$ $\delta = d / 3660$, а при $\text{Re} = 10^6$ $\delta = d / 28400$.

В задаче моделирования процессов электрогидродинамики в ходе кристаллизации кремния возможны несколько вариантов взаимодействия с тепловой задачей. Вязкость кремния резко увеличивается при температурах, близких к температуре кристаллизации. Объединение электрогидродинамической и тепловой задач позволяет снизить погрешность расчетов. Однако использование мультифизической модели с тремя приложениями делает крайне проблематичным получение решения. Подводя итог сказанному, можно выделить следующие положения:

1. При ламинарном движении жидкости происходит параллельное движение слоев жидкости: нулевая скорость у стенки и максимальная на оси трубы. Для повышения точности тепловых расчетов гидродинамическая и тепловая задачи должны решаться совместно, если вязкость зависит от температуры. Скорость рассчитывается в гидродинамической задаче и передается в виде параметра в тепловую задачу.

2. При турбулентном движении возможны два варианта:

– в первом случае тепловая и гидродинамическая задачи решаются совместно с передачей вектора скоростей из гидродинамической задачи в тепловую;

– во втором случае жидкость разделяется на два потока – пристенный толщиной δ и основной. Теплопроводность первого слоя принимается в соответствии со свойствами жидкости. Теплопроводность второго слоя принимается большей, как у металла. Скорость для первого слоя приравнивается нулю, а для второго принимается равной среднему значению. Объединение задач в этом случае не обязательно.

3. Невысокая скорость движения расплава предполагает ламинарный характер движения, однако под воздействием сил тяжести и электромагнитных сил образуются вихри. Отсутствие боковой стенки компенсируется наличием электромагнитного давления, распределенного внутри жидкости. Все это делает неопределенными условия гидродинамической задачи и приводит к погрешности при моделировании.

При поиске режимов работы кристаллизатора и параметров индуктора дополнительно должны решаться вопросы минимизации энергозатрат [18–21]. Эта задача важна потому, что требуется не только обеспечение заданного распределения электромагнитных сил по высоте, но и соответствие заданному времени кристаллизации слитка. Таким образом, форсирование охлаждения нежелательно. Напротив, все способы управления распределением температуры, включая перенос тепла одновременно с переносом массы, дают возможность учесть все возможности.

Турбулентные течения

Для практических целей, как правило, достаточно использовать осредненные характеристики движения, которые могут быть получены путем осреднения уравнений по некоторому малому интервалу времени T . В результате получается следующая система уравнений [22]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0; \quad (9)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{\rho u' u'} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\rho u' v'} \right]; \quad (10)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right] + \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \overline{\rho u' v'} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \overline{\rho v' v'} \right]; \quad (11)$$

где \bar{u} , \bar{v} – средние значения скорости; u' и v' – турбулентные флуктуации.

Для вывода уравнений переноса некоторых турбулентных величин и моделировании членов более высокого порядка используется так называемая $(k - \varepsilon)$ -модель, типичная модель турбулентности, основанная на двух уравнениях.

В $(k - \varepsilon)$ -модели выводятся уравнения для турбулентной кинетической энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ε :

$$k = 0.5(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) = 0.5(u'_i u'_i); \quad \varepsilon = \nu_T \left[\frac{\partial u'_j}{\partial x_j} \right] \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right].$$

Уравнения для k и ε имеют вид

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon; \quad (12)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \mu_T \varepsilon}{k} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon^2}{k}. \quad (13)$$

Левые части выражений (12) и (13) представляют конвективный перенос величин k и ε . В правой части уравнений описываются диффузия, выделение и диссипация рассматриваемых величин. Данные уравнения выведены из нестационарных уравнений Навье – Стокса, при этом в них сохранены диффузионные члены, за исключением соответствующих вязкой диссипации.

Локальная турбулентная вязкость μ_T записывается через локальные значения k и ε следующим образом:

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}. \quad (14)$$

Эмпирические константы в уравнениях (13), (14) равны

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.45, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.9. \quad (15)$$

Уравнения (12) и (13) справедливы при значениях вязкости $\mu_T \gg \mu$. Вблизи поверхности вводятся специальные пристенные функции, при определении которых принимают логарифмический закон изменения тангенциальной составляющей скорости в направлении нормали. Выделение турбулентной кинетической энергии в области действия логарифмического закона равно ее диссипации. Использование специальных пристенных функций позволяет определить граничные условия для k и ε на некотором расстоянии от поверхности.

Предложенная $(k - \varepsilon)$ -модель турбулентности используется далее для расчетов свободных сдвиговых и пограничных слоев и отрывных течений.

Для совместного решения электромагнитной задачи и задачи гидродинамики модели объединены.

Решение электромагнитной задачи при разной высоте расплавленного кремния должно удовлетворять значениям силы, приложенной к боковой поверхности слоя. Расчетные величины для расплава высотой 0,15 м радиусом 0,15 приведены в табл. 1. Номер столбца соответствует номеру слоя кремния. В четвертой строке таблицы приведены суммарные значения электромагнитных сил F_n^{rez} , действующих на расплав высотой H_n . В пятой строке указаны силы F_n^{em} , действующие на нижний слой, находящийся в жидком состоянии. При уменьшении общей высоты жидкости получение силы в каждом случае требует изменения тока индуктора. При расчете электромагнитных сил для разной высоты столба жидкой фазы слитка требуется обеспечение равенства заданного и расчетного значений для нижнего жидкого слоя для рассматриваемого варианта. Выполнение равенства суммарных сил не является критичным, так как форма слитка обеспечивается соблюдением равенства на границе твердой и жидкой фаз.

Таблица 1

Расчетные значения гидростатического давления и боковой силы в слоях расплава

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H_n , м	0,15	0,135	0,12	0,105	0,09	0,075	0,06	0,045	0,03	0,015
P , Па	3768	3425	3083	2740	2398	2055	1370	1028	685	342
F_n^{rez} , Н	484	392	310	237	174	121	77	44	19	5
F_n^{em} , Н	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9

При моделировании электромагнитных и гидродинамических процессов для загрузки приняты следующие значения параметров: электропроводность расплавленного кремния $\sigma = 10^6$ С/м; электропроводность твердого кремния $\sigma = 10^5$ С/м; радиус слитка $R=0,15$ м; высота слитка $H=0,15$ м; высота индуктора $H_u = 0,12$ м; плотность кремния $\rho = 2300$ кг/м³; динамическая вязкость жидкого кремния $\mu = 0,0007$ Па·с; вязкость твердого кремния $\mu = 1$ Па·с.

Для упрощения расчетов индуктор принят одновитковым с нулевой электропроводностью, чтобы обеспечить равномерное распределение тока в проводнике.

Расчеты выполнены для трех значений высоты жидкого слоя кремния – 0,15 м, 0,075 м, 0,015 м.

Для соответствия требуемому значению электромагнитной силы, действующей на боковую поверхность слитка, определен ток индуктора I , а также для нижнего слоя жидкого кремния определены заданное значение радиальной составляющей силы F_r^d , расчетное значение радиальной составляющей силы F_r^{sol} , расчетное значение аксиальной составляющей силы F_z^{sol} , мощность тепловыделения P . Расчетные значения для трех вариантов загрузки сведены табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения сил в расплаве кремния

№	$H_{ж}$, м	I , кА	F_r^d , Н	F_r^{sol} , Н	F_z^{sol} , Н	P , кВт
1	0,15	12,2	53,9	55	14,4	4,94
2	0,075	13,74	34,3	34,2	10,8	3,3
3	0,015	8,52	5	4,16	0,16	0,7

Диаграммы электромагнитных сил в расплаве зависят от высоты жидкой фазы, что показано на рис. 2–5. Кроме того, вид диаграмм существенно различается для радиальной (рис. 2, 3) и аксиальной (рис. 4, 5) координат.

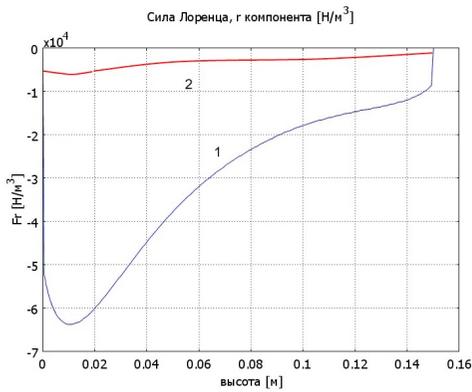


Рис. 2. Диаграммы распределения г-компоненты силы Лоренца по высоте слитка высотой 0,15 м: 1 – $r = 0,15$ м; 2 – $r = 0,12$ м

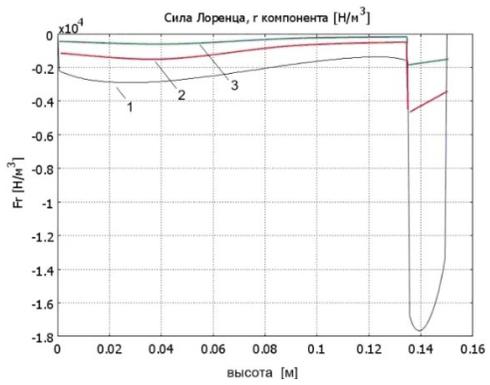


Рис. 3. Диаграммы распределения г-компоненты силы Лоренца вдоль оси z для расплава высотой 0,015 м: 1 – $r = 0,15$ м; 2 – $r = 0,12$ м; 3 – $r = 0,1$ м

Такое различие объясняется наклоном стенки катушки индуктора и ее смещением ниже основания слитка кремния. Можно отметить, что в верхнем углу расплава аксиальная компонента силы F_z^{sol} направлена вниз, что требует дополнительных энергетических затрат на формирование цилиндрической формы слитка (рис. 4, 5). Эта проблема успешно решается, так как значения радиальной составляющей сил намного больше, чем аксиальной составляющей.

В результате расчетов получено показанное на рис. 6 распределение электромагнитных сил в расплаве высотой 0,15 м, которое по мере затвердевания слитка значительно изменяется. Выше границы, разделяющей твердую и жидкую фазы, распределение сил сохраняет прежний вид. Ниже границы раздела силы уменьшаются на порядок, что объясняется снижением электропроводности при одновременном увеличении глубины проникновения поля в кремний.

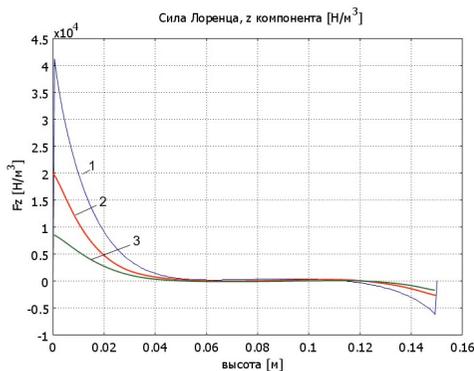


Рис. 4. Диаграммы распределения z компонента силы Лоренца по высоте слитка высотой 0,15 м: 1 – $r = 0,15$ м; 2 – $r = 0,12$ м; 3 – $r = 0,1$ м

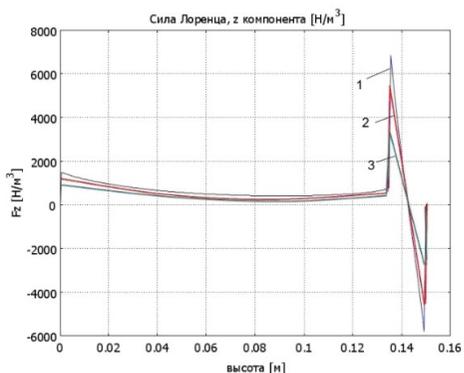


Рис. 5. Диаграммы распределения z компонента силы Лоренца вдоль оси z для расплава высотой 0,015 м: 1 – $r = 0,15$ м; 2 – $r = 0,12$ м; 3 – $r = 0,1$ м

Распределения скорости в жидкой фазе кремния для разной высоты расплава приведены на рис. 7–9. При высоте расплава 0,15 и 0,075 м формируются замк-

нутые вихри, обеспечивающие перенос жидкости с внешней во внутреннюю область и одновременно с верхней части в нижнюю (рис. 7, 8).

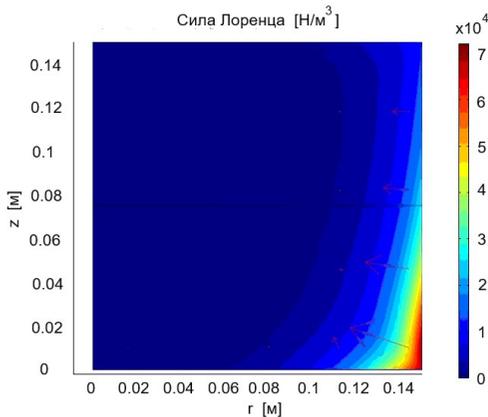


Рис. 6. Распределение силы Лоренца в расплаве кремния высотой 0,15 м

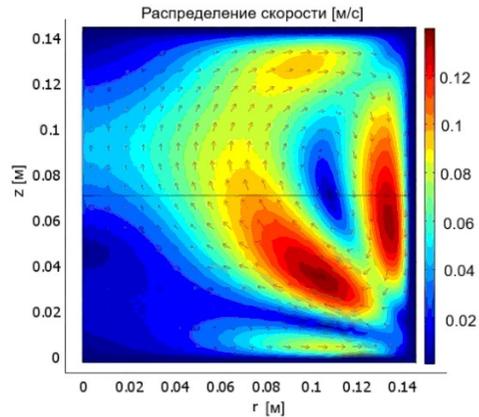


Рис. 7. Распределение скорости в расплаве кремния высотой 0,15 м

Это приводит к дополнительному переносу теплоты, что замедляет процесс кристаллизации в области боковой поверхности и является положительным фактом. При дальнейшем уменьшении высоты жидкой фазы (рис. 9) формирование вихрей затруднено и скорость движения сильно снижается.

Расчеты показали, что для принятых параметров слитка возникающие электромагнитные силы в вертикальном направлении приводят к появлению вихревого движения в слоях жидкости. Скорость движения не превышает 0,12 м/с и быстро снижается по мере перемещения фронта кристаллизации вверх. В целом эффект от перемешивания расплава можно оценить как положительный, так как он способствует затвердеванию поверхностного слоя позже, чем внутренние области.

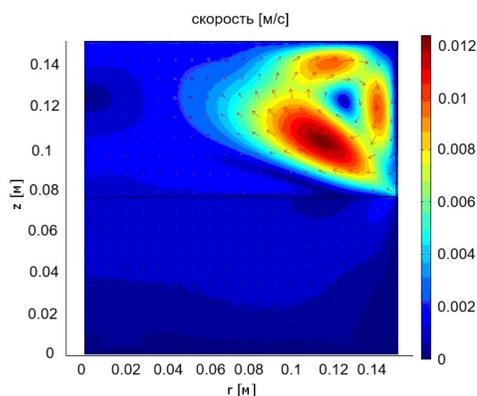


Рис. 8. Распределение скорости в расплаве кремния высотой 0,075 м

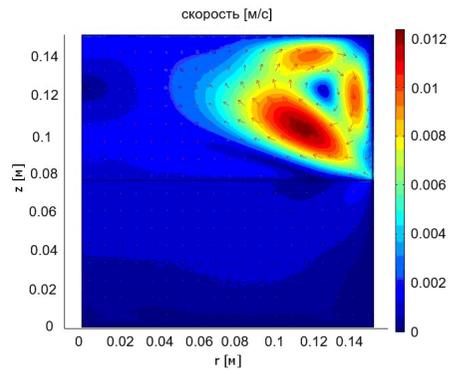


Рис. 9. Распределение поля скоростей в расплаве кремния высотой 0,015 м

Заключение

На основании проведенных исследований электрогидродинамических процессов в расплаве кремния определены характер и величина скорости движения жидкости под воздействием электромагнитных сил. Выявленные особенности распределения сил и скорости движения подтверждают возможность использования магнитного поля в качестве средства для изоляции расплава от футеровки с целью повышения чистоты слитков. Использование численного моделирования в рамках поставленной задачи показало эффективность расчетов для мультифизических задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гецелев З.Н., Балахонцев Г.А., Квасов Ф.И. и др.* Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. М.: Металлургия, 1983. 152 с.
2. *Первухин М.В., Сергеев Н.В., Хацаюк М.Ю.* Электромагнитный кристаллизатор для получения непрерывно литых слитков с высокими скоростями охлаждения // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2013. № 3. С. 121–129.
3. *Авдулов А.А., Усынина Г.П., Сергеев Н.В., Гудков И.С.* Технология литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор для производства длинномерных заготовок малого диаметра // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Химия. 2017. Т. 10. № 1. С. 82–89.
4. *Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М., Межин Ю.А.* Литье методом направленной кристаллизации с управляемым градиентом температуры на фронте кристаллизации // Литейное производство. 2016. № 8. С. 24–26.
5. *Демидович В.Б., Хацаюк М.Ю., Тимофеев В.Н., Максимов А.А.* Численное моделирование бесстигтельного плавления титанового сплава в переменном магнитном поле // Металлургия машиностроения. 2017. № 3. С. 2–5.
6. *Chakraborty S., Ganguly S., Talukdar P.* Determination of optimal taper in continuous casting billet mould using thermo-mechanical models of mould and billet // Journal of Materials Processing Technology. Vol. 270. 2019. Pp. 132–141.
7. *Керимов Р.И., Байрамова А.Т.* Улучшение качества сортовых заготовок путем применения электромагнитного перемешивания металла // Современные проблемы теории машин. 2019. № 7. С. 78–82. doi: 10.26160/2307-342X-2019-7-78-82
8. *Мурашталова Р.Р., Столяр А.М., Потанова М.В.* Оценка влияния электромагнитного перемешивания металла на загрязненность неметаллическими включениями сортовой непрерывнолитой заготовки // Теория и технология металлургического производства. 2018. № 2 (25). С. 10–13.
9. *Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю.* Анализ электромагнитных процессов магнитогидродинамического перемешивания жидких металлов // Электричество. 2017. № 1. С. 35–44.
10. *Goryslavets Y.M., Ladokhin S.V., Glukhenkiy O.I., Lapshuk T.V., Bondar O.I., Drozd E.O.* Numerical investigation of the electromagnetic stirring system of liquid metal in skull crucible with electron-beam melting // Technical electro-dynamics. 2018. № 4. С. 118–126. doi: 10.15407/techned2018.04.118
11. *Максимов А.А., Хацаюк М.Ю., Тимофеев В.Н.* Анализ влияния нормальной составляющей электромагнитных сил в процессе МГД-перемешивания расплава // Технология легких сплавов. 2018. № 4. С. 106–112.
12. *Кучинский М.Ю., Первухин М.В., Винтер Э.Р., Тимофеев С.П.* Исследование технологических режимов электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины кристаллизующегося алюминиевого слитка // Вопросы электротехнологии. 2021. № 4 (33). С. 13–22.
13. *Немцов М.В.* Модель поля электромагнитных сил процесса перемешивания жидкой стали при непрерывном литье заготовок // Электротехника. 2015. № 2. С. 61–66.
14. *Koppen D., Baake E., Mrowka-Nowotnik G.* Stirrings of melt during solidification process for effective grain fragmentation using pulsed electromagnetic fields // Electrichestvo. 2019. № 6. С. 66–69.
15. *Швыцкий Е.Л., Сокунов Б.А., Бычков С.А., Соколов И.В.* Электромагнитное перемешивание кристаллизующегося слитка индуктором с неравномерной линейной нагрузкой // Вопросы электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 20–26.

16. *Тимченко С.Л.* Движения жидкого металла в форме под действием электромагнитной силы // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2011. № 2 (41). С. 78–86.
17. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.
18. *Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э., Сокунов Б.А., Урманов Ю.Р.* Снижение энергозатрат в металлургическом производстве за счет применения МГД-технологий // Промышленная энергетика. М.: Энергопрогресс. 2016. № 12. С. 21–27.
19. *Соколовская Л.А., Мамшиев В.А.* О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве // Процессы литья. 2009. № 2. С. 24–29.
20. *Балакин Ю.А., Завалишин И.В., Шумская Л.П.* Разработка теоретических основ инновационных технологий внешнего воздействия на кристаллизацию металлов // Качество. Инновации. Образование. 2016. № 2 (129). С. 23–30.
21. *Bazarov A.A., Navasardian A.A., Bondareva N.V.* Processes modeling in a silicon induction crystallizer // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE: International Conference on Industrial Engineering. 2022. С. 657–667.
22. *Флетчер К.* Численные методы на основе метода Галеркина. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 252 с.

Статья поступила в редакцию 14 октября 2022 г.

ELECTRO-HYDRODYNAMIC PROCESSES IN AN ELECTROMAGNETIC SILICON CRYSTALLIZER

*A.A. Bazarov, A.A. Navasardyan**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru

Abstract. *In this publication, the issues of computer simulation of electromagnetic and hydrodynamic processes in an electromagnetic crystallizer mold of a silicon melt of periodic action are considered. The crystallization process proceeds under conditions of additional heating by eddy currents in the melt. The main task of the electromagnetic interaction of currents in the melt and the inductor field is to create a repulsive force to exclude mechanical contact between silicon and the lining surface. When this problem is solved, heat is released in the melt and a vector of forces is formed, which leads to mixing of liquid silicon. These processes affect the transfer of heat between the lower, upper and side surfaces of the cylinder, the shape of which is taken by the melt. To improve the quality of the crystal structure of the ingot, a temperature gradient is formed by controlling heat flows due to the thickness of the lining walls, heating the upper surface and removing heat from the lower base.*

The appearance of a perturbing action under these conditions can upset the balance of heat flows and lead to the creation of thermal stresses in the ingot, accompanied by microcracks. Simultaneous modeling of all processes occurring in an electromagnetic silicon crystallizer is currently unrealizable on a personal computer.

When modeling the process of hydrodynamics in the melt, several geometry options were considered, starting from the maximum volume of the liquid phase and ending with a thin upper layer in the upper part. With a conical shape of the inductor, the distribution of the force vector in the melt depends on the axial coordinate, which leads to a significant decrease in the velocity components as the thickness of the liquid phase decreases. The results of the study showed a rapid decrease in the mixing effect as the thickness of the liquid layer of silicon decreases with a slight change in the overall parameters of the crystallization process.

Keywords: *induction heating, crystallization, silicon, finite element method, electromagnetic forces, hydrodynamic processes.*

REFERENCES

1. *Getsel'ev Z.N., Balakhontsev G.A., Kvasov F.I.* Nepreryvnoye lit'ye v elektromagnitnyy kristallizator. M.: Metalluggiya, 1983. 152 p.
2. *Pervukhin M.V., Sergeev N.V., Khatsayuk M.Yu.* Elektromagnitnyy kristallizator dlya polucheniya nepreryvno litykh slitkov s vysokimi skorostyami okhlazhdeniya // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika. 2013. N 3. Pp. 121–129.
3. *Avdulov A.A., Usynina G.P., Sergeev N.V., Gudkov I.S.* Tekhnologiya lit'ya aluminievykh splavov v elektromagnitnyy kristallizator dlya proizvodstva dlinnomernykh zagotovok malogo diametra // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya; Khimiya. 2017. T.10. № 1. Pp. 82–89.

* *Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Ashot A. Navasardyan, master.*

4. *Kolyadov Ye.V., Gerasimov V.V., Visik Ye.M., Mezhin Yu.A.* Lit'ye metodom napravlennoy kristallizatsii s upravlyayemym gradientom temperatury na fronte kristallizatsii // Liteynoye proizvodstvo. 2016. № 8. Pp. 24–26.
5. *Demidovich V.B., Khatsayuk M.Yu., Timofeev V.N., Maksimov A.A.* Chislennoe modelirovanie bestigel'nogo plavlenniya titanovogo splava v peremennom magnitnom pole // Metallurgiya mashinostroeniya. 2017. N 3. Pp. 2–5.
6. *Chakraborty S., Ganguly S., Talukda P.* Determination of optimal taper in continuous casting billet mould using thermo-mechanical models of mould and billet // Journal of Materials Processing Technology. Vol. 270. 2019. Pp. 132–141.
7. *Kerimov R.I., Bayramova A.T.* Uluchshenie kachestva sortovykh azgotovok putem primeneniya elektromagnitnogo peremeshivaniya metalla // Sovremennyye problem teorii mashin № 7. 2019. Pp. 78–82.
8. *Muraptalova R.R., Stolarov A.M., Potapova M.V.* Otsenka vliyaniya elektromagnitnogo peremeshivaniya metalla na zagryaznennost nemetallicheskimy vkluchenyami sortovoy nepreryvnoy zagotovki // Teoriya i tekhnologii metallurgicheskogo proizvodstva № 2 (25). 2018. Pp. 10.
9. *Timofeev V.N., Khatsayuk M.Yu.* Analiz elektromagnitnykh protsessov magnitogidrodinamicheskogo peremeshivaniya zhidkikh metallov // Elektrichestvo. № 1. 2017. Pp. 35–44.
10. *Goryslavets Y.M., Ladokhin S.V., Glukhenki O.I., Lapshuk T.V., Bondar O.I., Drozd E.O.* Numerical investigation of the electromagnetic stirring system of liquid metal in skull crucible with electron-beam melting // Technical electroynamics. № 4. 2018. Pp. 118–126. DOI: 10.15407/techned2018.04.118
11. *Maksimov A.A., Khatsayuk M.Yu., Timofeev V.N.* Analiz vlianiya normal'noy sostavlyayushey elektromagnitnykh sil v protsesse MGD-peremeshivaniya rasplava // Tekhnologiya legkikh splavov. № 4. 2018. Pp. 106–112.
12. *Kuchinskiy M.Yu., Pervukhin M.V., Vinter E.R., Timofeev C.P.* Issledovanie tekhnologicheskikh rezhimov elektromagnitnogo peremeshivaniya zhidkoy serdtseviny kristallizuyushegosya aluminiyevogo slitka // Voprosy elektrotekhnologii. № 4 (33). 2021. Pp. 13–22.
13. *Nemtsov M.V.* Model polya elektromagnitnykh sil protsessa peremeshivaniya zhidkoy stali pri nepreryvnom lit'e zagotovok // Elektrotehnika. 2015. № 2. Pp. 61–66.
14. *Koppen D., Baake E., Mrowka-Nowotnik G.* Stirrings of melt during solidification process for effective grain fragmentation using pulsed electromagnetic fields // Elektrichestvo. 2019. № 6. Pp. 66–69.
15. *Shvidkiy E.L., Sokunov B.A., Bychkov S.A., Sokolov I.V.* Elektromagnitnoe peremeshivanie kristallizuyushegosya slitka induktorom s neravnomernoy lineynoy nagruzkoy // Voprosy elektrotekhnologii. 2018. № 1 (18). Pp. 20–26.
16. *Timchenko S.L.* Dvizhenie zhidkikhogo metalla v forme pod deystviem elektromagnitnoy sily // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki. 2011. 2(41). Pp. 78–80.
17. *Miheev M.A., Miheeva I.M.* Osnovy teploperedachi. Izd. 2-e, stereotip. M.: Energiya, 1977. 344 p.
18. *Sarapulov F.N., Frizen V.E., Sokunov B.A., Urmanov Yu.P.* Snizhenie energozarat v metallurgicheskome proizvodstve za schet primeneniya MGD-tekhnologii // Promyshlennaya energetika. M.: Energoprogress. 2016. Pp. 21–27.
19. *Sokolovskaya L.A., Mamishev V.A.* O matematicheskom modelirovanii s fazovymi perekhodami v metallurgii i liteynom proizvodstve // Pritsessy lit'ya. 2009. N 2. Pp. 24–29.
20. *Balakin Yu.A., Zavzlishin I.V., Shumskaya L.P.* Razrabotka teoreticheskikh osnov innovatsionnykh tekhnologiy vneshnego vozdeystviya na kristallizatsiyu metallov // Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye. 2016. № 2(129). Pp. 23–30.
21. *Bazarov A.A., Navasardian A.A., Bondareva N.V.* Processes Modeling in a Silicon Induction Crystallizer // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. Pp. 657–667.
22. *Fletcher K.* Chislennyye metody na osnove metoda Galerkina. M.: Mir, 1988. Pp. 252.

УДК 621.313

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯКОРЯ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ю.В. Зубков, В.Е. Верецагин*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: zub577@mail.ru

Аннотация. Электрический привод широко распространен в практике автомобилестроения. Его основой является электрический тяговый двигатель (ТД), который по сравнению с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) имеет такие преимущества, как высокий КПД, большая перегрузочная способность, широкий диапазон регулирования частоты вращения, возможность непосредственной передачи момента на ведущие колеса. Основными требованиями к тяговому двигателю являются высокая эффективность во всем диапазоне нагрузок, простота регулирования скорости и крутящего момента, высокая перегрузочная способность, малые масса и габариты, способность к рекуперативному торможению, широкий диапазон регулирования частоты вращения, простота и удобство обслуживания. Наибольшее распространение в качестве тяговых двигателей нашли синхронные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). Они отличаются высокой плотностью крутящего момента, эффективностью и постоянством мощности в широком диапазоне изменения частот вращения. Однако существует ряд проблем, сдерживающих внедрение этих электрических машин в тяговый привод отечественных автомобилей, одной из которых является отсутствие методики выбора конструкции якоря и индуктора на стадии расчета основных размеров ТД с магнитоэлектрическим возбуждением с учетом многообразия схем и способов исполнения обмотки, размещения ПМ в индукторе. В статье изложены вопросы выбора электромагнитных нагрузок при различных способах охлаждения, величины немагнитного зазора, предложен алгоритм электромагнитного расчета по максимальному моменту, содержащий ряд уточняющих циклов. Значения индуктивностей и коэффициентов проектирования определяются при численном моделировании магнитного поля. Рассмотрены особенности конструктивного и схемного исполнения активной зоны и обмотки якоря. Получены кривые распределения магнитодвижущих сил распределенной и сосредоточенной обмоток, сделан их гармонический анализ, даны рекомендации по конфигурации активной зоны якоря ТД.

Ключевые слова: тяговый двигатель, постоянные магниты, проектирование, обмотка якоря

Введение

Борьба с загрязнением окружающей среды и циклически повторяющийся энергетический мировой кризис привели к скачкообразному развитию тягового электропривода, преимущественно в области легковых транспортных средств

* Зубков Юрий Валентинович, доктор технических наук, профессор.
Верецагин Владислав Евгеньевич, старший преподаватель.

(ТС). Автомобили с полностью электрической или гибридной силовой установкой являются более экологически безопасными по сравнению с ТС на двигателе внутреннего сгорания (ДВС), а эффективность применения электрической тяги для передвижения не вызывает сомнений.

Основой электропривода ТС является электрический тяговый двигатель (ТД), который имеет неоспоримые преимущества по сравнению с ДВС: высокий КПД, большую перегрузочную способность, широкий диапазон регулирования частоты вращения, возможность реализации прямого привода колес. Тип этого двигателя определяется на начальном этапе создания электромобиля. Основными требованиями к тяговому двигателю являются: высокая эффективность во всем диапазоне нагрузок; простота регулирования скорости и крутящего момента; высокая перегрузочная способность; малые масса и габариты; способность к рекуперативному торможению; широкий диапазон регулирования частоты вращения; простота и удобство обслуживания [1, 2]. Кроме того, важным фактором является его стоимость.

Помимо перечисленного от ТД требуется соответствие его характеристик всем возможным режимам движения ТС, которые условно можно разделить на следующие [3, 4]:

1. ТД должен обеспечивать постоянный момент до определенной частоты вращения, называемой «базовой скоростью». Обычно эта скорость лимитируется величиной выходного напряжения инвертора. На низкой частоте вращения требуется более высокий крутящий момент, так как чем больше постоянный крутящий момент, тем выше ускорение ТС. Это область постоянного момента.

2. Диапазон скоростей, в котором ТД должен обеспечивать постоянную мощность. Когда скорость доходит до «базовой», напряжение и ток инвертора достигают максимальных значений. При этом инвертор не в состоянии обеспечить дальнейший рост мощности ТД, поэтому данный диапазон называется областью постоянной мощности.

3. При увеличении скорости выше «базовой» происходит уменьшение крутящего момента ТД. Это область, где скорость ТС быстро растет, а мощность ТД не может оставаться постоянной, поэтому инвертор снижает ток силовой обмотки ТД.

В качестве тяговых двигателей в ТС принципиально возможно использование электромеханических преобразователей постоянного и переменного тока. В мировой практике электроавтомобилестроения наибольшее распространение получили IPM (insert permanent magnet) – синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). Они широко используются в гибридных автомобилях и электромобилях благодаря присущим им достоинствам, в том числе высокой плотности крутящего момента, эффективности и постоянству мощности в широком диапазоне изменения частот вращения [5, 6]. Благодаря конструктивной анизотропии индуктора (проводимость магнитного потока по осям d и q различна) IPM машины имеют более высокую плотность крутящего момента, чем другие электромеханические преобразователи. Правильно спроектированный двигатель может обеспечить хорошее ослабление потока и возможность перегрузки без негативных последствий.

Большое число научных публикаций и растущий интерес фирм-производителей тягового электрооборудования в Российской Федерации к возможности его практической реализации свидетельствует о перспективности данного научного направления. При этом ряд вопросов, связанных с проектированием

ем и оптимизацией тяговых электрических двигателей, остаются нерешенными. В частности, отсутствует методика выбора конструкции якоря и индуктора на стадии расчета основных размеров ТД с магнитоэлектрическим возбуждением с учетом многообразия схем и способов исполнения обмотки, размещения ПМ в индукторе. Разработка методики определения размеров активной зоны двигателя и выбора типа обмотки является насущной задачей. В данной статье делается такая попытка. Электромеханический преобразователь с постоянными магнитами в гибридном ТС работает как двигатель в стандартном цикле движения или как генератор в период торможения и распределения мощности по бортовым системам. Базовый режим работы – двигательный, поэтому подход к разработке и созданию тягового ЭМП – как к проектированию двигателя.

Входные параметры электромагнитного расчета и границы их изменения

В техническом задании на проектирование ТД оговариваются величина пускового момента и диапазон рабочих скоростей ТС. Нагрузка тягового двигателя постоянно меняется при изменении режимов движения ТС. Зная скоростной профиль автомобиля (рис. 1), передаточное отношение главной передачи и диаметр колеса ТС, можно определить вращающий момент, который принимается за максимальный.

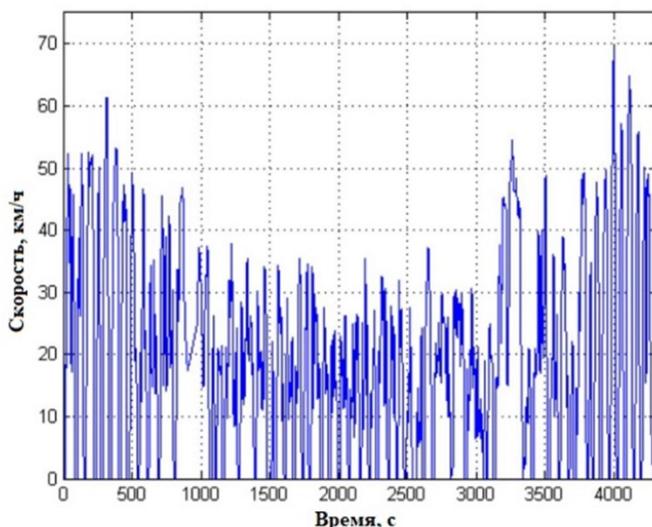


Рис. 1. Скоростной профиль автомобиля малой грузоподъемности в городском цикле

Из этих же данных находится среднее значение момента за рабочий цикл. При номинальной (базовой) частоте вращения этот момент соответствует выходной мощности. Тяговый двигатель обычно должен обеспечивать кратность пускового момента не менее 2...3 [7]. В нашем случае при среднем моменте 500 Нм и максимальном моменте 1700 Нм кратность пускового момента составляет 3, 4.

Напряжение преобразователя принято 400 В, номинальная (базовая) частота вращения двигателя 1500 об/мин. Уровень мощности и напряжения силового электронного блока обычно определяет максимально допустимый ток инвертора. Перегрузка бортового накопителя энергии ограничивает мощность и тем самым

снижает максимальный ток. Таким образом, максимальный допустимый ток также является одним из параметров задания.

Электромагнитный момент может быть выражен через амплитуду радиальной составляющей индукции поля возбуждения B_{0m} , линейную плотность поверхностного тока (линейную нагрузку) A и угол между амплитудами этих волн индукции и линейной нагрузки β :

$$M = \pi R^2 l_\delta B_{0m} A \cdot \cos \beta,$$

где R – радиус расточки статора; l_δ – длина зазора.

Амплитуды линейной нагрузки и индукции, выраженные через ток в силовой обмотке I_1 и магнитный поток Φ_m :

$$A = \frac{\sqrt{2} m I_1 w k_{об}}{\tau \cdot p}; \quad B_{0m} = \frac{\pi \Phi_m}{2\tau \cdot l_\delta},$$

где m – число фаз; $w k_{об}$ – число эффективных витков фазы обмотки; τ – полюсное деление; p – число пар полюсов.

Тогда выражение для вращающего момента

$$M = \frac{p m}{\sqrt{2}} \cdot \Psi_{10m} I_1 \sin \psi.$$

Здесь $\Psi_{10m} = w k_{об} \Phi_m$ – потокосцепление с фазой обмотки; $\psi = \beta + \frac{\pi}{2}$ – угол между векторами потокосцепления (ЭДС холостого хода) и тока.

Значения линейной нагрузки выбираются с учетом способа охлаждения. С целью уменьшения массогабаритных показателей ТД может быть рекомендовано жидкостное охлаждение, которое допускает для мощностей 80...110 кВт на частотах вращения 1500...2500 об/мин величину линейной нагрузки 90...150 кА/м и плотности тока в обмотке 4...6 А/мм². При выборе линейной нагрузки и плотности тока следует учитывать тип обмотки. Зубцовые обмотки допускают большие значения данных параметров по сравнению с распределенными за счет коротких лобовых частей, меньших электрических потерь, лучших условий теплоотдачи от наиболее нагретых частей обмотки. Для зубцовых обмоток рекомендуется плотность тока до 7 А/мм². В области низких частот вращения допускается превышение указанных значений до 2...3 раз, однако данный переходный процесс характерен для разгона тягового привода и длится несколько секунд, поэтому не оказывает сколь-нибудь значимого влияния на температурное состояние ТД.

Алгоритм проектирования тягового двигателя

В процессе проектирования имеется большое число независимых параметров, которые необходимо определить для достижения конечного результата в виде проекта. Некоторые параметры устанавливаются требованиями эксплуатации, например величина напряжения. Алгоритм проектирования состоит из нескольких основных этапов:

- определение главных размеров ТД;
- выбор типа обмотки и конфигурации активной зоны якоря;
- расчет индуктора и определение объема ПМ;
- контроль механической прочности вращающейся части ТД.

На рис. 2 показана блок-схема алгоритма проектирования тягового двигателя.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма проектирования ТД по максимуму момента

В качестве ограничения целесообразно использовать внешний диаметр статора, выбираемый с учетом свободного пространства на борту ТС. Длина активной части в процессе проектирования должна обеспечить требуемые момент или индуктивность. Выходным критерием является величина электромагнитного момента ТД, который он развивает в найденных габаритах. Момент двигателя может быть определен как

$$M = \frac{mp}{4\pi^2 n^2} \left(\frac{U \cdot E_0}{L_d} \sin \theta + \frac{U^2 (L_d - L_q)}{2L_d L_q} \sin 2\theta \right), \quad (1)$$

где n – частота вращения; U – фазное напряжение; L_d , L_q – индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям соответственно; θ – угол нагрузки.

Синхронная индуктивность по продольной оси

$$L_d = \frac{2m\mu_0}{\pi^2} \cdot \frac{\tau}{p \cdot \delta k_\delta k_\mu} l \cdot (k_{об} w)^2 k_{ad}, \quad (2)$$

$\delta k_\delta k_\mu$ – эффективный зазор с учетом зубчатости статора и насыщения магнитопровода; k_{ad} – коэффициент формы поля продольной реакции якоря.

Из (1) и (2) следует, что максимальный момент, который может обеспечить двигатель при определенном максимальном токе, можно увеличить за счет роста числа эффективных витков обмотки при сохранении тока инвертора. Это приводит к увеличению как линейной токовой нагрузки, так и синхронной индуктив-

ности, что, в свою очередь, влияет на способность к ослаблению поля и изменению диапазона регулирования частоты вращения ТД. Другой способ воздействия на величину момента и регулировочную способность – изменение коэффициентов формы поля продольной и поперечной реакции якоря, что в ИРМ машине достигается выбором соответствующей конструкции индуктора и расположения в нем ПМ.

В соответствии с предложенным алгоритмом на начальном этапе выбирают следующие параметры: бортовое напряжение шины постоянного тока, номинальная частота вращения ТД, число полюсов с учетом частоты перемагничивания на верхнем пределе скорости и величины удельных магнитных потерь на этой частоте. Далее по внешнему диаметру ТД, выбранной системе охлаждения, моменту определяется длина активной части с учетом отношения диаметра ротора к его внешнему диаметру k_D :

$$l_\delta = \frac{2k_e M_n}{\pi \alpha_\delta k_B k_{ob} AB_\delta \cdot (D_n k_D)^2 \eta \cos \varphi}, \quad (3)$$

где k_e – коэффициент ЭДС, учитывающий внутреннее падение напряжения в обмотке якоря при номинальной нагрузке; α_δ – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; k_B – коэффициент формы кривой ЭДС; k_{ob} – обмоточный коэффициент.

Расчетные коэффициенты полюсного перекрытия и формы ЭДС были определены для выбранной конфигурации ИРМ индуктора при численном моделировании магнитного поля ТД в нагрузочном режиме работы при различных значениях конструктивного коэффициента полюсного перекрытия α [8]. На рис. 3, 4 показано поперечное сечение прототипа ТД с ИРМ индуктором и зависимости указанных коэффициентов от величины полюсного перекрытия. Моделирование магнитного поля проводилось при неизменном объеме ПМ и величине немагнитного зазора.

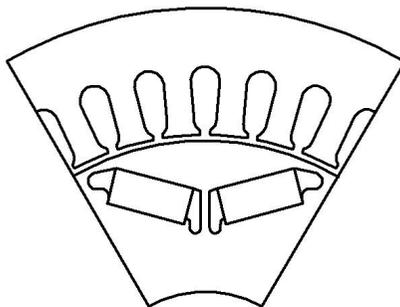


Рис. 3. Фрагмент поперечного сечения ТД

Отдельно следует остановиться на выборе величины зазора. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше пусковой ток при асинхронном пуске двигателя. С другой стороны, влияние реакции якоря и тормозной момент увеличиваются по мере того, как зазор уменьшается. При использовании высококоэффициентных ПМ увеличение размагничивающего действия реакции якоря при уменьшении зазора не является критичным. Зазор в ТД может варьироваться от долей мм до 4...6 мм в зависимости от частоты вращения. На выбор зазора влияют и требова-

ния по допустимой величине эксцентриситета ротора, обеспечению достаточной прочности конструкции машины в целом. Использование бандажной гильзы для фиксации ПМ на роторе в конструкции с SPM (поверхностное расположение ПМ) индуктором предполагает увеличение немагнитного зазора между статором и ротором на толщину гильзы.

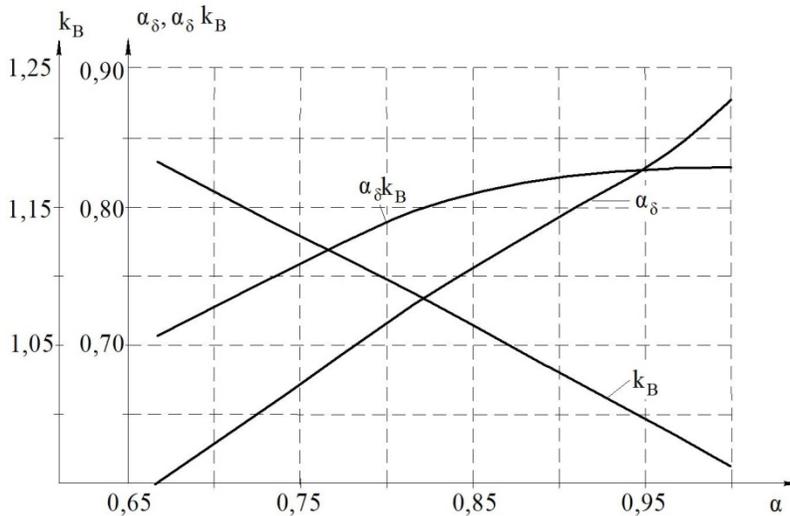


Рис. 4. Зависимости расчетных коэффициентов поля от величины полюсного перекрытия

Финальные рекомендации по электрическим, магнитным нагрузкам и величине немагнитного зазора для ТД мощностью 60...120 кВт на базе СМ с инкорпорированными магнитами можно сформулировать так:

- линейная нагрузка при воздушном охлаждении 60...90 кА/м, при жидкостном охлаждении в зависимости от теплоносителя и схемы отвода тепла 90...150 кА/м;

- плотность тока в силовой обмотке 4...6 А/мм² для распределенных обмоток, до 7 А/мм² для зубцовых обмоток за счет меньшей длины лобовых частей и меньшего тепловыделения в обмотке;

- максимальная индукция в зазоре зависит от способа размещения ПМ в индукторе, для ИРМ машин с V-образной конфигурацией магнитов 0,5...0,7 Тл. Большие значения соответствуют большому объему и магнитной энергии ПМ;

- немагнитный зазор в зависимости от марки ПМ (величин коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r) 0,8... 1,5 мм.

Зубцовая зона и конструкция обмоток ТД

После определения основных размеров проектируется зубцовая зона и сердечник статора в целом. Здесь следует принимать во внимание необходимость размещения большой токовой нагрузки на ограниченном диаметре, который, как было сказано выше, связан с особенностями компоновки ТД в свободном пространстве транспортного средства. Обмотка якоря может быть распределенной (РО) или сосредоточенной (СО).

Распределенные многофазные обмотки хорошо известны [9, 10]. Традиционно их сильными сторонами являются: отлаженная технология, возможность укорочения шага и распределения (улучшения гармонического состава МДС), высокий обмоточный коэффициент для основной гармоники поля, эффективная борьба с зубцовыми гармониками путем скоса пазов, выполнения полюсов в виде шеврона, проточек в коронках зубцов и т. д. Однако при выполнении распределенной обмотки пазы получаются узкими и глубокими. Обмотка, расположенная в таких пазах, имеет повышенное индуктивное сопротивление рассеяния за счет увеличенной проводимости пазового рассеяния. Данное обстоятельство приводит к росту коэффициента ЭДС k_e , входящего в формулу (3), и увеличению габаритов ТД. За счет длинных лобовых частей увеличены электрические потери в обмотке, а большой их вылет вынуждает увеличивать конструктивную длину машины и, как следствие, ее вес. Укладка РО, особенно двухслойной, труднее поддается автоматизации, что увеличивает стоимость обмоточных работ и ТД в целом.

Для преодоления указанных недостатков применяются концентрические сосредоточенные обмотки [11], в том числе и в тяговых двигателях [12]. На рис. 5 показан фрагмент якоря с распределенной и сосредоточенной обмотками.

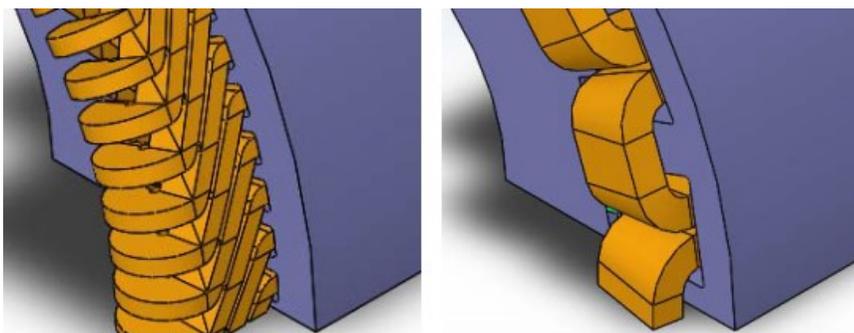


Рис. 5. Якорь с распределенной и сосредоточенной обмотками

Сосредоточенная концентрическая обмотка, также называемая зубцовой, имеет меньшие вылет и длину лобовых частей. Лобовые части секций такой обмотки, относящиеся к разным пазам и фазам, не перекрещиваются, что существенно снижает требования к электрической прочности изоляции и позволяет увеличить коэффициент заполнения паза обмоточным материалом. У распределенной обмотки витки в лобовых частях перекрещиваются, и их сложнее изолировать. Для ТД с сосредоточенной обмоткой характерны меньшие высота, масса ярма и сердечника якоря благодаря меньшей величине магнитной индукции на этом участке магнитопровода. В ТД с СО существует возможность увеличения линейной нагрузки за счет сокращения числа пазов. Они имеют меньшую осевую длину за счет компактных лобовых частей и больший коэффициент заполнения паза из-за меньшей площади корпусной изоляции. Наконец, отсутствие пересечений катушек разных фаз снижает до минимума возможность возникновения межфазного короткого замыкания, а высокое значение индуктивности рассеяния способствует уменьшению тока установившегося короткого замыкания.

Анализ магнитодвижущей силы распределенной и сосредоточенной обмоток

Сосредоточенная обмотка имеет ограничения по комбинации чисел полюсов и пазов. Согласно теории обмоток переменного тока число пазов на полюс и фазу q может быть найдено как

$$q = \frac{Z}{2pt},$$

где Z – полное число пазов; m – число фаз.

У распределенных обмоток шаг выбирается близким к произведению mq , и в большинстве случаев q – целое число. Сосредоточенная обмотка имеет шаг $y=1$ и дробное q . Для сравнения обоих типов обмоток сделаем допущение о неизменной топологии ротора и равенстве числа полюсов ($2p=6$). Распределенная обмотка расположена в 36 пазах и выполнена с $q=2$. Для сосредоточенной обмотки из-за ограничения по ширине катушки число пазов выбрано $Z=9$ и $q=1/2$.

Важные характеристики ТД, такие как индукция в воздушном зазоре, электромагнитный момент и его пульсации, магнитные радиальные силы, напрямую связаны с распределением магнитодвижущей силы (МДС) обмотки. На рис. 6 показана МДС распределенной обмотки.

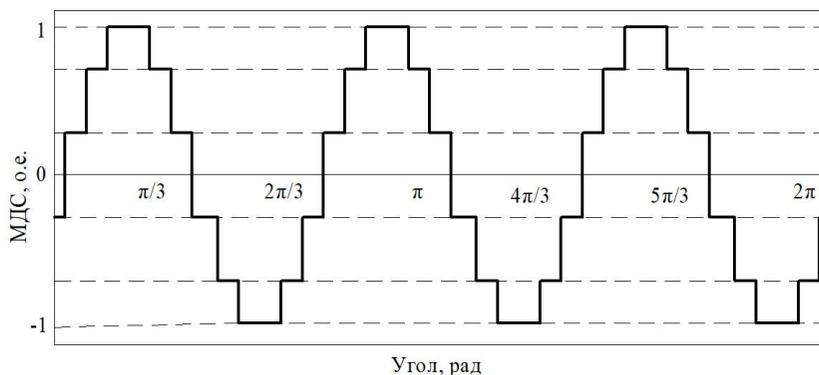


Рис. 6. МДС распределенной обмотки

Обмотка создает симметричную вращающуюся волну МДС, первая гармоника которой взаимодействует с основным потоком постоянных магнитов и создает электромагнитный момент. Амплитуда высших (нечетных) гармоник незначительна, поэтому распределение поля в зазоре близко к синусоидальному. Разложение МДС в ряд Фурье определяется следующим уравнением:

$$F(x, t) = \sum_v \frac{m w k_{o\delta v}}{\pi v} \cdot I_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi v}{\tau} \cdot x + \theta\right), \quad (4)$$

где m – число фаз; w – число витков в фазе; v – номер гармоники; I_m – амплитуда тока; ω – угловая частота; τ – полюсное деление; $k_{o\delta v}$ – обмоточный коэффициент для v -й гармоники.

Обмоточный коэффициент распределенной обмотки

$$k_{\sigma v} = k_{yv} \cdot k_{pv} = \sin\left(\frac{v \cdot 5\pi}{12}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{v\pi}{6}\right)}{2 \sin\left(\frac{v\pi}{12}\right)},$$

где k_{yv} , k_{pv} – коэффициенты укорочения и распределения соответственно.

МДС сосредоточенной обмотки можно также разложить в ряд Фурье по выражению (4) с учетом значения обмоточного коэффициента для гармонических составляющих $k_{\sigma v} = \sin\left(\frac{v\pi}{3}\right)$. МДС такой обмотки показана на рис. 7.

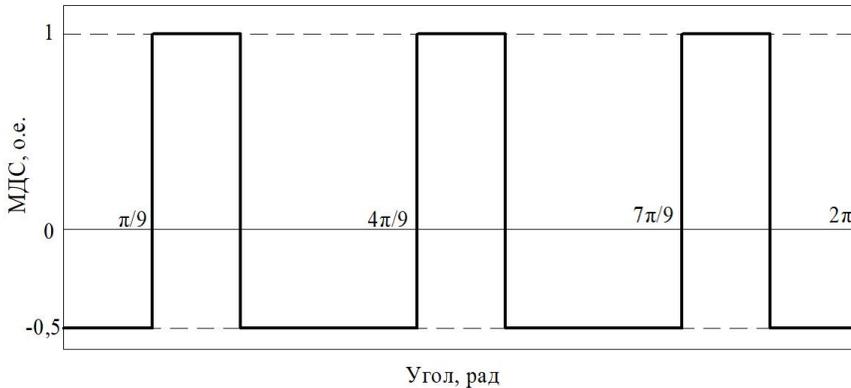


Рис. 7. МДС сосредоточенной обмотки

В спектре помимо основной присутствуют высшие гармоники с относительно большой амплитудой, в том числе четные. Это обуславливает возрастание добавочных потерь, пульсаций момента в двигателе с такой обмоткой.

По результатам проведенных исследований и предложенному алгоритму был спроектирован и изготовлен тяговый двигатель для автомобиля малой грузоподъемности. Испытания опытного образца ТД с распределенной обмоткой якоря подтвердили правильность теоретических положений, лежащих в основе методики электромагнитного расчета.

Заключение

1. Определены базовые параметры электромагнитного расчета ТД и границы их изменения в процессе проектирования, составлен алгоритм проектирования по критерию величины электромагнитного момента.

2. В результате решения ряда задач расчета магнитного поля найдены коэффициенты формы ЭДС и полюсного перекрытия и определена их зависимость от относительной величины полюсной дуги. Приемлемые значения конструктивно-коэффициента полюсного перекрытия составляют 0,8...0,9.

3. Осуществлен анализ МДС распределенной и сосредоточенной обмоток якоря двигателя на предмет содержания высших пространственных гармоник. Установлено, что распределенная обмотка имеет более высокий обмоточный коэффициент в поле основной гармоники и низкое содержание высших гармониче-

ских в кривой МДС, поэтому может быть рекомендована для использования в тяговых двигателях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jose C.P., Meikandasivam S.A.* Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles // In Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. Singapore. 2017. Pp. 211–229.
2. *Boldea I., Nasar S.A.* Electric drives // Boca Raton: CRC Press, 1999. 411 p.
3. *Анучин А.С., Алямки, Д.И., Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М., Остриров В.Н.* Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта // Электротехника. Знак. 2015. № 1. С. 5–9.
4. *Слепцов М.А.* Основы электротранспорта. М.: Академия, 2006.
5. *Wang Y., Bianchi N., Bolognani S., Alberti L.* Synchronous Motors for Traction Applications // 2017 Int. Conf. of Electrical and Electronic Technologies for Automotive. DOI: 10.23919/EETA.2017.7993210.
6. *Макарничев Ю.А., Зубков Ю.В., Верещагин В.Е., Владимиров Д.А.* Магнитоэлектрический двигатель-генератор автономного мобильного объекта // Электроэнергия. Передача и распределение. № 3(66). 2021. С. 118–127.
7. *Patil M.S., Dhamal S.S., Wagh K.K.* A Detailed Motor Selection for Electric Vehicle Traction System // Proc. of the Third Int. Conf. on I-SMAC, 2019. Pp. 679–684.
8. *Макарничев Ю.А., Зубков Ю.В., Иванников Ю.Н., Гуляев И.В.* Анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки // Электротехника. 2019. № 7. С. 24–32.
9. *Bukšnaitis J.* Estimation of Winding Factors of Two-layer Three-phase Fractional Windings // Elektronika and Elektrotechnika, 2009. № 8(96). Pp. 23–26.
10. *Жерве Г.К.* Обмотки электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 400 с.
11. *Беспалов В.Я., Коварский М.Е., Сидоров А.О.* Исследование пульсаций электромагнитного момента синхронных машин с постоянными магнитами с целым и дробным значениями q // Электричество. 2018. № 5. С. 45–52.
12. *Захаренко А.Б.* Создание высокомоментных электрических машин с постоянными магнитами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01. М.: МЭИ, 2008. 42 с.
13. *Зубков Ю.В., Кауров С.Ю., Верещагин В.Е.* Исследование работы интегрированного стартер-генератора при запуске двигателя внутреннего сгорания // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. № 3(67). С. 125–138.
14. *Анучин А.С.* Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: Дис. ... докт. техн. наук. МЭИ, 2018. 445 с.
15. *Бербиренков И.А., Лохнин В.В.* Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе автомобиля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. № 2. Т. 7. С. 10–12.
16. *Gerada D., Xu Z., Huang Xu, Gerada Ch.* Fully-integrated high-speed IM for improving high-power marine engines // IET Electric Power Applications. 2019. V.13. Iss. 2. Pp. 148–153.

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2022 г.

DESIGNING OF TRACTION MOTOR STATORS CORE

*Yu.V. Zubkov, V.E. Vereshagin**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: zub577@mail.ru

Abstract. *Electric drive is widely used in automotive practice. Its basis is an electric traction motor (TM), which, compared with an internal combustion engine (ICE), has such advantages as high efficiency, high overload capacity, a wide range of speed control, and the possibility of torque direct transmission to the drive wheels. The main requirements for a traction motor are high efficiency over the entire load range, ease of speed and torque control, high overload capacity, small weight and dimensions, regenerative braking capability, wide speed control range, simplicity and ease of maintenance. The most widely used as traction motors are synchronous electric machines with excitation from permanent magnets (PM). They are characterized by high torque density, efficiency and power consistency over a wide speed range. However, there are a number of problems that hinder the introduction of these electric machines in the traction drive of home cars, one of which is the lack of a methodology for choosing the design of an armature and an inductor at the stage of calculating the main dimensions of an TM with magnetolectric excitation, taking into account the variety of schemes and methods of winding, PM placement in the inductor. The article deals with the issues of choosing electromagnetic loads for various cooling methods, the size of the non-magnetic gap, an algorithm for electromagnetic calculation based on the maximum torque, containing a number of refining cycles, is proposed. The values of inductances and design factors are determined by numerical simulation of the magnetic field. The features of the design and circuit design of the core and armature winding are considered. Distribution curves of magnetomotive forces of distributed and concentrated windings are obtained, their harmonic analysis is made, recommendations are given on the configuration of the TD armature active zone.*

Keywords: *traction motor, permanent magnets, design, armature winding*

REFERENCES

1. Jose C.P., Meikandasivam S.A. Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles // In Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. Singapore. 2017. Pp. 211–229.
2. Boldea I., Nasar S.A. Electric drives // Boca Raton: CRC Press, 1999. 411 p.
3. Anuchin A.S., Alyamkin D.I., Kozachenko V.F., Lashkevich M.M., Ostrirov V.N. Directions for the development and optimization of electric drive systems for urban hybrid and electric transport // Elektrotechnica. Znakh. 2015. No. 1. Pp. 5–9.
4. Sleptsov M.A. Osnovy elektricheskogo transporta [Fundamentals of electric transport]. M.: Akademiya, 2006. 465 pp.
5. Wang Y., Bianchi N., Bolognani S., Alberti L. Synchronous Motors for Traction Applications // 2017 Int. Conf. of Electrical and Electronic Technologies for Automotive. DOI: 10.23919/EETA.2017.7993210.
6. Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Vereshagin V.E., Vladimirov D.A. Magnetolectric motor-generator of an autonomous mobile object // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. No. 3(66). 2021. Pp. 118–127.

* Yuri V. Zubkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladislav E. Vereshagin, Postgraduate Student.

7. *Patil M.S., Dhamal S.S., Wagh K.K.* A Detailed Motor Selection for Electric Vehicle Traction System // Proc. of the Third Int. Conf. on I-SMAC. 2019. Pp. 679–684.
8. *Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Ivannikov Yu.N., Gulyaev I.V.* Analysis of the Characteristics of an Electromechanical Starter in a Gas Turbine Plant // Russian Electrical Engineering. 2019. No. 7. Pp. 24–32.
9. *Bukšnaitis J.* Estimation of Winding Factors of Two-layer Three-phase Fractional Windings // Elektronika and Elektrotechnika. 2009. No. 8(96). Pp. 23–26.
10. *Gerve G.K.* Obmotki elektricheskikh mashin [Windings of electrical machines]. Leningrad: Energoatomizdat, 1989. 400 p.
11. *Bespalov V.Ya., Kovarskiy M.E., Sidorov A.O.* Investigation of electromagnetic torque pulsations of synchronous machines with permanent magnets with integer and fractional q values // Elektrichestvo. 2018. No. 5. Pp. 45–52.
12. *Zaharenko A.B.* Sozdanie visokomomentnykh elektricheskikh mashin s postoyannymi magnitami: Diss. ... dokt. tech. nauk. Moscow, MEI, 2008. 42 p.
13. *Zubkov Yu.V., Kaurov S.Yu., Vereshagin V.E.* Study of the operation of an integrated starter-generator when starting an internal combustion engine // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2020. No. 3(67). Pp. 125–138.
14. *Anuchin A.S.* Razrabotka tsifrovyykh sistem effektivnogo upravleniya komplektov tyagovogo elektrooborudovaniya gibridnykh elektricheskikh transportnykh sredstv: Diss. ... dokt. tech. nauk. Moscow, MEI, 2018. 445 p.
15. *Berbirenkov I.A., Lohnin V.V.* Traction motors with permanent magnets in the electric drive of a car // Elek. i inform. kompl. i sist. 2011. Vol. 7, No. 2. Pp. 10–12.
16. *Gerada D., Xu Z., Huang Xu, Gerada Ch.* Fully-integrated high-speed IM for improving high-power marine engines // IET Electric Power Applications. 2019. V. 13, Iss. 2. Pp. 148–153.

УДК 621.3.078

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СТАНЦИЯХ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЖНЫМИ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСАМИ

*А.В. Стариков, А.А. Казанцев, И.А. Косорлуков**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: star58@mail.ru, kazantzev@63.ru, kosorlukov@gmail.com

Аннотация. Рассмотрена задача определения условий, при которых применение частотного преобразователя в станции управления погружными насосами приводит к снижению затрат электрической энергии и становится эффективным с энергетической точки зрения. Приведены аналитические выражения, позволяющие рассчитать удельные затраты электрической энергии при механизированной добыче нефти для случая, когда режим работы и дебит скважины обеспечиваются дросселированием устьевого штуцера. При этом особое внимание уделено определению скорости вращения погружного асинхронного двигателя, обеспечивающей требуемое расположение рабочей точки на напорной характеристике насоса. Приведены также формулы, позволяющие рассчитать удельные затраты электрической энергии при механизированной добыче нефти для случая, когда режим работы и дебит скважины задаются частотным преобразователем станции управления. Найдено аналитическое выражение для определения скорости вращения и частоты питающего напряжения, обеспечивающих требуемую рабочую точку насоса при частотном регулировании погружного электродвигателя. Предложено с помощью приведенных аналитических выражений итерационным методом производить расчет производительности насоса, при которой удельные затраты электроэнергии на добычу кубометра жидкости будут равны как в случае использования частотного преобразователя в станции управления, так и без него. Приведен пример расчета такого граничного значения производительности насоса для гипотетической скважины. Показано, что уменьшение требуемого дебита относительно граничного значения производительности насоса приводит к снижению удельных затрат электрической энергии при механизированной добыче нефти в случае применения частотного преобразователя в станции управления погружным насосом.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, погружной насос, погружной электродвигатель, удельное потребление электроэнергии

Введение

Частотные преобразователи находят широкое применение в станциях управления погружными центробежными насосами. При этом они выполняют целый

* Стариков Александр Владимирович, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика», доктор технических наук, профессор.

Казанцев Александр Андреевич, старший преподаватель.

Косорлуков Игорь Андреевич, докторант, кандидат технических наук.

ряд важных задач: плавный пуск погружного электродвигателя (ПЭД), вывод нефтяной скважины на стационарный режим работы по требуемому закону, стабилизация динамического уровня жидкости в скважине [1–5]. Плавный пуск ПЭД позволяет увеличить межремонтный период скважины за счет снижения пусковых токов и ограничения момента нагрузки на входном валу центробежного насоса. Организация требуемого закона изменения динамического уровня жидкости в скважине обеспечивает вывод нефтяной скважины на установившийся режим работы без перегрева ПЭД. Стабилизация динамического уровня жидкости позволяет эксплуатировать скважину в длительном режиме со строго заданным дебитом. Все эти аспекты очень важны с технологической точки зрения механизированной добычи нефти и обеспечивают большой экономический эффект. Однако применение частотного преобразователя в станции управления погружным центробежным насосом может привести к увеличению удельных затрат электроэнергии. Действительно, частотный преобразователь обладает собственным коэффициентом полезного действия и коэффициентом мощности, что приводит к дополнительным затратам электроэнергии по сравнению с вариантом использования станции управления без частотного преобразователя. Кроме того, выходное напряжение инвертора содержит высшие гармоники, которые приводят к дополнительным потерям в повышающем трансформаторе и погружном электродвигателе [6]. С другой стороны, для обеспечения требуемого дебита скважины, оснащенной погружным насосом со станцией управления без частотного преобразователя, может применяться дросселирование штуцера, установленного на устье. В этом случае на штуцере будут происходить гидравлические потери, которые вызывают дополнительные затраты электрической энергии. Частотный преобразователь позволяет регулировать скорость вращения погружного электродвигателя и обеспечивать требуемый дебит скважины при полностью открытом штуцере. В связи с этим появляется задача определения условий, при которых применение частотного преобразователя в станции управления приводит к снижению затрат электрической энергии и становится эффективным с энергетической точки зрения.

Аналитические зависимости для определения потребления электрической энергии электротехническим комплексом добывающей скважины

Для определения потерь в элементах электротехнического комплекса добывающей скважины прежде всего необходимо знать величину активной мощности, которую требуется подвести к входному валу центробежного насоса от ПЭД. Она будет определяться следующим выражением [7, 8]:

$$P_{SP} = \frac{H_{SP} Q_{SP} \rho g}{86400 \eta_{SP}} + M_{0SP} \omega, \quad (1)$$

где H_{SP} – напор насоса, измеряемый в метрах водяного столба (м вод. ст.); Q_{SP} – производительность насоса, м³/сутки; η_{SP} – коэффициент полезного действия (КПД) центробежного насоса; ρ – плотность добываемой нефтяной смеси; g – ускорение свободного падения; M_{0SP} – момент трогания насоса; ω – скорость вращения насоса и ПЭД.

Однако следует учитывать, что напорная характеристика центробежного насоса описывается уравнением [7, 9]

$$H_{SP} = aQ_{SP}^2 + b\omega Q_{SP} + c\omega^2, \quad (2)$$

где a , b и c определяются по трем характерным точкам напорной характеристики насоса, приведенной в каталоге, пересчитанной на откачку нефтяной смеси с учетом коэффициентов K_{Qv} , $K_{Q\beta}$, K_{Hv} и $K_{H\beta}$, характеризующих снижение производительности и напора из-за влияния вязкости жидкости и газового фактора.

Подставив (2) в (1), получим формулу

$$P_{SP1} = \frac{(aQ_{SP}^3 + bQ_{SP}^2\omega_1 + cQ_{SP}\omega_1^2)\rho g}{86400\eta_{SP1}} + M_{0SP}\omega_1, \quad (3)$$

где η_{SP1} – КПД центробежного насоса, соответствующий рабочей точке.

В случае, когда в станции управления погружным насосом не используется частотный преобразователь, рабочая точка насоса с требуемой производительностью Q_{SP} устанавливается дросселированием штуцера. При этом нагрузка погружного асинхронного двигателя изменяется, что приводит и к вариации скорости ω_1 . Для ее определения предположим, что на рабочем участке механическая характеристика асинхронного двигателя близка к линейной. Тогда можно записать следующее равенство [10]:

$$\frac{\omega_0 - \omega_1}{M_1} = \frac{\omega_0 - \omega_{nom}}{M_{nom}}, \quad (4)$$

где ω_{nom} и M_{nom} – номинальные значения скорости и момента ПЭД; ω_0 – скорость идеального холостого хода двигателя; M_1 – фактическая величина момента на валу ПЭД, которую можно определить по формуле

$$M_1 = \frac{P_{SP1}}{\omega_1}. \quad (5)$$

Подставляя (3) в (5) и затем в (4), получим квадратное уравнение относительно скорости вращения ПЭД и центробежного насоса ω_1 :

$$\begin{aligned} & [86400\eta_{SP1}M_{nom} + cQ_{SP}\rho g(\omega_0 - \omega_{nom})]\omega_1^2 - \\ & - [86400\eta_{SP}\omega_0M_{nom} - (86400\eta_{SP1}M_0 + bQ_{SP}^2\rho g)(\omega_0 - \omega_{nom})]\omega_1 + \\ & + 4aQ_{SP}^3\rho g(\omega_0 - \omega_{nom}) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Исходя из реального физического смысла из (6) следуют формулы для определения скорости ω :

$$\begin{aligned} & [86400\eta_{SP}\omega_0M_{nom} - (86400\eta_{SP1}M_0 + bQ_{SP}^2\rho g)(\omega_0 - \omega_{nom})] + \\ & + \sqrt{[86400\eta_{SP}\omega_0M_{nom} - (86400\eta_{SP1}M_0 + bQ_{SP}^2\rho g)(\omega_0 - \omega_{nom})]^2 - \\ & - 4aQ_{SP}^3\rho g(\omega_0 - \omega_{nom})[86400\eta_{SP1}M_{nom} + cQ_{SP}\rho g(\omega_0 - \omega_{nom})]} \\ \omega_1 = & \frac{\quad}{2[86400\eta_{SP1}M_{nom} + cQ_{SP}\rho g(\omega_0 - \omega_{nom})]}. \end{aligned} \quad (7)$$

Подстановка (7) в (2) и (3) позволяет найти фактический напор H_{SP} , развиваемый насосом, и потребляемую им мощность P_{SP} . При этом потребляемая ПЭД активная мощность будет равна

$$P_{SM1} = \frac{P_{SP1}}{\eta_{SM}}, \quad (8)$$

где η_{SM} – КПД погружного электродвигателя.

Реактивная мощность, потребляемая ПЭД, будет определяться формулой [8, 11]

$$Q_{SM1} = 3U_{11}^2 \left(\frac{s_1^2 X_k}{R_{2G}^2 + s_1^2 X_k^2} + \frac{U_{11}^v}{X_m} \right), \quad (9)$$

где U_{11} – фазное напряжение статора ПЭД в рассматриваемом случае;

$s_1 = \frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_0}$ – фактическое скольжение ротора двигателя; R_{2G} , X_k и X_m – пара-

метры Г-образной схемы замещения ПЭД; v – коэффициент, учитывающий нелинейность характеристики намагничивания.

Если непосредственно к обмотке статора ПЭД подключена трехфазная конденсаторная батарея, то она компенсирует потребляемую реактивную мощность на величину

$$Q_{CU1} = \frac{3U_{11}^2}{X_{CU}},$$

где X_{CU} – реактивное сопротивление конденсаторной установки при частоте питающего напряжения 50 Гц.

Суммарная реактивная мощность, потребляемая ПЭД с учетом индивидуальной конденсаторной батареи [8]:

$$Q_{SM1} = 3U_{11}^2 \left[\frac{s_1^2 X_k}{R_{2G}^2 + s_1^2 X_k^2} + \frac{U_{11}^v}{X_m} - \frac{1}{X_{CU}} \right]. \quad (10)$$

Формула (10) является более общей, и в случае, если конденсаторная батарея отсутствует, в ней принимается $X_{CU1} = \infty$.

Рассчитав по формулам (9) и (10) активную и реактивную мощность, потребляемую ПЭД, можно определить потери активной и реактивной мощности на кабеле, соединяющем электродвигатель с повышающим трансформатором [11]:

$$\Delta P_{CL1} = \frac{(P_{SM1}^2 + Q_{SM1}^2) R_{CL}}{U_{11}^2}; \quad (11)$$

$$\Delta Q_{CL1} = \frac{(P_{SM1}^2 + Q_{SM1}^2) X_{CL}}{U_{11}^2}, \quad (12)$$

где R_{CL} и X_{CL} – активное и индуктивное сопротивления одной жилы соединительного кабеля.

Активное сопротивление жилы соединительного кабеля определяется по известной формуле [12]

$$R_{CL} = \frac{0,0175 \cdot [1 + 0,004 \cdot (T_{CL} - 20)] (H_{SD} + 50)}{S_{CL}}, \quad (13)$$

где T_{CL} и S_{CL} – средняя температура и сечение соединительного кабеля; H_{SD} – глубина спуска погружной установки, а индуктивное сопротивление находится из справочных данных [13].

Активная, реактивная и полная нагрузка на выходе повышающего трансформатора определяются формулами:

$$P_{SUT1} = P_{SM1} + \Delta P_{CL1}; \quad (14)$$

$$Q_{SUT1} = Q_{SM1} + \Delta Q_{CL1}; \quad (15)$$

$$S_{SUT1} = \sqrt{P_{SUT1}^2 + Q_{SUT1}^2}. \quad (16)$$

Значение, полученное с помощью формулы (16), позволяет рассчитать коэффициент загрузки повышающего трансформатора:

$$\beta_{SUT1} = \frac{S_{SUT1}}{10^3 S_{SUT.nom}}, \quad (17)$$

где $S_{SUT.nom}$ – номинальная мощность повышающего трансформатора, выраженная в кВА.

Активные потери в повышающем трансформаторе определяются по формуле [8, 14]

$$\Delta P_{SUT1} = 10^3 (\Delta P_{nl.SUT} + \beta_{SUT1}^2 \Delta P_{sc.SUT}), \quad (18)$$

где $\Delta P_{nl.SUT}$, $\Delta Q_{nl.SUT}$, $\Delta P_{sc.SUT}$ и $\Delta Q_{sc.SUT}$ – активные и реактивные потери холостого хода и короткого замыкания повышающего трансформатора, берущиеся из его паспортных данных.

Активная мощность, снимаемая с выхода станции управления, определяется следующим образом:

$$P_{CS1} = P_{SUT1} + \Delta P_{SUT1}. \quad (19)$$

Формулы (1) – (19) являются основой для расчета потребления электрической энергии электротехническим комплексом нефтедобывающей скважины для случая, когда станция управления погружным насосом не оснащена частотным преобразователем, а требуемый дебит скважины Q_{SP} обеспечивается дросселированием штуцера. Количество потребляемой станцией управления активной составляющей электрической энергии в сутки при этом будет равно

$$W_{AE1} = \frac{24}{10^3} P_{CS1}, \quad (20)$$

а удельные затраты энергии на добычу кубометра жидкости из скважины составят

$$E_{AE1} = \frac{24 P_{CS1}}{10^3 Q_{SP}}. \quad (21)$$

В случае применения в станции управления погружным насосом частотного преобразователя скорость ПЭД должна быть равна

$$\omega_2 = \frac{-bQ_{SP} + \sqrt{b^2 Q_{SP}^2 + 4c \left(H_{DIN} + H_{GL} + \frac{P_{BUF}}{\rho g} - aQ_{SP}^2 \right)}}{2c}, \quad (22)$$

где H_{DIN} – динамический уровень жидкости в скважине; H_{HPL} – гидравлические потери напора в насосно-компрессорных трубах; P_{BUF} – буферное давление на устье скважины.

Эта скорость может быть достигнута, если частотный преобразователь сформирует на своем выходе трехфазную систему напряжений частотой

$$f_1 = \frac{Z_p c (\omega_0 - \omega_{nom}) (a Q_{SP}^3 + b Q_{SP}^2 \omega_2 + c Q_{SP} \omega_2^2) \rho g}{86400 \pi \eta_{SP2} M_{nom} \omega_2} + \frac{Z_p \omega_2}{2\pi}, \quad (23)$$

где Z_p – число пар полюсов ПЭД; η_{SP2} – КПД центробежного насоса, соответствующий новой рабочей точке.

Тогда активная мощность, потребляемая ПЭД при работе со скоростью ω_2 , будет равна

$$P_{SP2} = \frac{(a Q_{SP}^3 + b Q_{SP}^2 \omega_2 + c Q_{SP} \omega_2^2) \rho g}{86400 \eta_{SP2}} + M_{0SP} \omega_2. \quad (24)$$

В большинстве случаев частотный преобразователь станции управления задает частоту напряжения на статорных обмотках ПЭД меньше номинальной, и реактивную мощность, потребляемую ПЭД при управлении от частотного преобразователя, можно рассчитать по формуле

$$Q_{SM2} = 3U_{12}^2 \left[\frac{s_2^2 X_k \frac{f_1}{50}}{R_{2G}^2 + s_2^2 \left(X_k \frac{f_1}{50} \right)^2} + \frac{1}{X_m \frac{f_1}{50}} - \frac{1}{X_{CU} \frac{f_1}{50}} \right], \quad (25)$$

где U_{12} – действующее значение фазного напряжения на статоре ПЭД в случае управления от частотного преобразователя; $s_2 = \frac{2\pi f_1 - Z_p \omega_2}{2\pi f_1}$.

Потери активной и реактивной мощности на кабеле, соединяющем электродвигатель с повышающим трансформатором, определяются по формулам, аналогичным (11) и (12):

$$\Delta P_{CL2} = \frac{(P_{SM2}^2 + Q_{SM2}^2) R_{CL}}{U_{12}^2}; \quad (26)$$

$$\Delta Q_{CL2} = \frac{(P_{SM2}^2 + Q_{SM2}^2) X_{CL}}{U_{12}^2}. \quad (27)$$

Следовательно, активная, реактивная и полная нагрузка на выходе повышающего трансформатора при использовании частотного преобразователя в станции управления равны

$$P_{SUT2} = P_{SM2} + \Delta P_{CL2}; \quad (28)$$

$$Q_{SUT2} = Q_{SM2} + \Delta Q_{CL2}; \quad (29)$$

$$S_{SUT2} = \sqrt{P_{SUT2}^2 + Q_{SUT2}^2}, \quad (30)$$

а уточненное выражение для расчета активных потерь повышающего трансформатора будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta P_{SUT2} = 10^3 (\Delta P_{nl.SUT} + \beta_{SUT2}^2 \Delta P_{sc.SUT}) k_{\Delta P}, \quad (31)$$

где $\Delta P_{nl.SUT}$ и $\Delta P_{sc.SUT}$ – активные потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора, берущиеся из его паспортных данных; $\beta_{SUT2} = \frac{S_{SUT2}}{10^3 S_{SUT.nom}}$; $k_{\Delta P}$ –

коэффициент, учитывающий увеличение потерь в повышающем трансформаторе за счет действия высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя.

Частотный преобразователь обладает собственными КПД η_{FC} , поэтому активную мощность, потребляемую станцией управления погружным насосом, можно рассчитать по формуле

$$P_{CS2} = \frac{P_{SUT2} + \Delta P_{SUT2}}{\eta_{FC}}. \quad (32)$$

Количество потребляемой станцией управления, оснащенной частотным преобразователем, активной составляющей электрической энергии в сутки при этом будет равно

$$W_{AE2} = \frac{24}{10^3} P_{CS2}, \quad (33)$$

а удельные затраты энергии на добычу кубометра жидкости из скважины составят

$$E_{AE2} = \frac{24 P_{CS2}}{10^3 Q_{SP}}. \quad (34)$$

Приравнявая P_{CS2} и P_{CS1} , то есть формулы (34) и (20), получим условие, при котором удельные затраты электроэнергии на добычу кубометра жидкости будут равны как в случае использования частотного преобразователя в станции управления, так и без него:

$$\frac{P_{SUT2} + \Delta P_{SUT2}}{\eta_{FC}} = P_{SUT1} + \Delta P_{SUT1}. \quad (35)$$

Подставляя последовательно в (35) формулы (3), (7), (8), (10)–(19) и (22)–(32), можно найти уравнение для определения граничного значения производительности и, следовательно, дебита скважины, при котором экономии электрической энергии не будет наблюдаться при использовании частотного преобразователя в станции управления погружным насосом. Оно будет включать в себя сложную зависимость мощности, потребляемой станцией управления с частотным преобразователем, от производительности насоса $P_{CS2}(Q_{SP})$:

$$P_{CS2}(Q_{SP}) = P_{SUT1} + \Delta P_{SUT1}. \quad (36)$$

Следует отметить, что решение (36) целесообразно производить численными методами, например в программе MathCAD, варьируя величину Q_{SP} от номинальной величины вниз с определенным шагом.

Пример расчета значения производительности насоса, являющейся границей экономии электрической энергии в случае применения частотного преобразователя в станции управления погружным насосом

Проведем для примера расчет производительности насоса и, соответственно, дебита гипотетической скважины, при которых затраты электрической энергии одинаковы как в случае применения частотного преобразователя в станции управления, так и при работе погружного электродвигателя на номинальных напряжении и частоте и дросселировании штуцера.

Допустим, что гипотетическая скважина обладает следующими техническими характеристиками: требуемый дебит скважины $Q_{OW} = 98 \text{ м}^3/\text{сут}$; коэффициент

продуктивности $k_{PF} = 9,118 \cdot 10^{-6}$ м³/Па·сут; $P_{BUF} = 1,5 \cdot 10^6$ Па; статический уровень жидкости в скважине $H_{ST} = 180$ м; $H_{DIN} = 1235$ м; глубина спуска насоса $H_{SD} = 1469$ м; $\rho = 1041$ кг/м³. Воспользовавшись методикой оптимального выбора погружного оборудования [7, 15], можно прийти к выводу, что для рассматриваемой скважины необходим насос 0215ЭЦНАКИ5-125И с номинальной производительностью на воде $Q_{SPW.nom} = 125$ м³/сут, напором $H_{SPW.nom} = 1450$ м вод. ст., максимальным КПД $\eta_{SPW.nom} = 0,53$ и моментом трогания $M_0 = 8,2$ Нм. При этом на номинальной скорости вращения с учетом вязкости и газосодержания жидкости будут наблюдаться реальные производительность насоса $Q_{SP.nom} = 120$ м³/сут и напор $H_{SP.nom} = 1392$ м вод. ст. Из напорной характеристики, приведенной в каталоге [19], следуют следующие значения коэффициентов, описывающих ее вид: $a = -0,062685$ сут.²/м⁵; $b = 0,021534$ сут.с/м²рад; $c = 0,01623$ мс²/рад². Взяв коэффициент запаса по мощности $K_p = 1,124$, выберем для установки центробежного насоса погружной асинхронный электродвигатель ЭДТ45-103М1 со следующими номинальными данными: мощность $P_{SM.nom} = 45$ кВт; линейное напряжение $U_{11.nom} = 1400$ В; ток $I_{1.nom} = 28$ А; коэффициент полезного действия $\eta_{SM} = 81$ %; $\cos \varphi_{SM} = 0,83$; скольжение $s_{nom} = 0,055$; число пар полюсов $Z_p = 1$; скорость идеального холостого хода $\omega_0 = 314$ рад/с; номинальная скорость $\omega_{nom} = 296,9$ рад/с; номинальный момент $M_{nom} = 151,6$ Нм; $R_{2G} = 1,868$ Ом; $X_k = 6,884$ Ом; $X_m = 68,414$ Ом; $0 k_{\eta SM} = 0,94$ [16]. При рассматриваемой глубине спуска установки погружного электроцентробежного насоса, сечении кабеля $S_{CL} = 25$ мм² и его средней температуре $T_{CL} = 50$ градусов активное сопротивление, рассчитанное по формуле (13), будет равно $R_{CL} = 1,199$ Ом, а индуктивное сопротивление на номинальной частоте составит $X_{CL} = 0,126$ Ом. Для согласования напряжения ПЭД с напряжением станции управления установлен повышающий трансформатор ТМПНГ100/3 номинальной мощностью 100 кВА, который характеризуется следующими потерями: холостого хода $\Delta P_{nl.SUT} = 0,31$ кВт, короткого замыкания $\Delta P_{sc.SUT} = 2,4$ кВт [17]. При этом для учета дополнительных потерь от действия высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя примем $k_{\Delta P} = 1,05$. Также следует отметить, что в рассматриваемом варианте комплектации погружного оборудования индивидуальная конденсаторная батарея для компенсации реактивной мощности ПЭД не применяется, а КПД частотного преобразователя равно $\eta_{FC} = 0,96$.

Подставляя эти данные в формулы (3)–(36), набранные в программе MathCAD, и варьируя производительность насоса Q_{SP} от 120 м³/сут вниз с переменным шагом, найдем граничное значение производительности $Q_{SP.BV}$, при котором потребляемая активная мощность электротехническим комплексом нефтяной скважины как в случае применения частотного преобразователя, так и без него будет одной и той же. Проведенные расчеты показывают, что для рассматриваемой скважины $Q_{SP.BV} = 98,91$ м³/сут, при этом в обоих случаях потребляется станцией управления погружным насосом активная мощность составляет 52,7 кВт. Таким образом, следует ожидать, что при требуемом дебите $Q_{OW} = 98$ м³/сут

применение частотного преобразователя приведет к экономии электрической энергии. Действительно, расчет показывает, что при $Q_{SP} = 98 \text{ м}^3/\text{сут}$ потребляемая станцией управления активная мощность в случае дросселирования штуцера равна 52,12 кВт, а в случае применения частотного преобразователя – 51,57 кВт. То есть можно сказать, что применение частотного преобразователя в станции управления погружным насосом рассматриваемой гипотетической скважины приведет к снижению потребляемой активной мощности на 0,54 кВт. В результате суточное потребление электрической энергии снизится на 13,1 кВт·час.

Для сравнения подсчитано граничное значение производительности насоса без учета дополнительных потерь мощности в повышающем трансформаторе и ПЭД от действия высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя, которое составляет $Q_{SP.BV} = 104,56 \text{ м}^3/\text{сут}$. Это приводит к тому, что экономия электрической энергии при требуемой производительности насоса в $Q_{SP} = 98 \text{ м}^3/\text{сут}$ возрастает до 91,6 кВт·час в сутки.

Если в процессе подбора погружного оборудования не использовалась методика энергоэффективного дизайна и погружной насос совместно с электродвигателем были выбраны с большим запасом, энергетическая эффективность применения частотного преобразователя еще более возрастет. Действительно, если для той же скважины и выбранной установки центробежного насоса необходимо обеспечить дебит в $90 \text{ м}^3/\text{сут}$, то потребляемая станцией управления активная мощность при дросселировании штуцера будет равна 51,41 кВт, а в случае применения частотного преобразователя – 44,89 кВт. Следовательно, будет наблюдаться экономия потребляемой электроэнергии в 156,4 кВт·час в сутки, что приведет к снижению удельных затрат при механизированной добыче нефти на $E_{AE1} - E_{AE2} = 1,738 \text{ кВт·час} / \text{м}^3$.

Однако следует отметить, что экономия электрической энергии является не основной задачей частотных преобразователей, применяемых в станциях управления погружными насосами. Действительно, частотные преобразователи за счет своих функциональных возможностей позволяют увеличить межремонтный период скважины как минимум в 2 раза [18], что приводит к значительному экономическому эффекту.

Выводы

1. Приведенные аналитические зависимости позволили рассчитать приведенные затраты электрической энергии при механизированной добыче нефти погружными центробежными насосами как в случае обеспечения требуемого режима работы методом дросселирования устьевого штуцера, так и в случае применения частотного преобразователя в станции управления погружными насосами, при использовании которого экономия электроэнергии составляет около 13 %.

2. Полученные аналитические выражения позволили также определить оптимальные условия, при которых применение частотных преобразователей в станциях управления погружными насосами приводит к снижению удельных затрат электрической энергии при механизированной добыче нефти.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Живаева В.В., Стариков А.В., Стариков В.А.* Применение частотно-регулируемого электропривода для вывода скважины на стационарный режим // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2009. № 1 (23). С. 142–151.
2. Патент России № 2370673, МКИ F04D 15/00, F04D 13/10. Система управления погружным электроцентробежным насосом / *В.В. Живаева, А.В. Стариков, В.А. Стариков* (Россия) // Оpubл. 20.10.2009, Бюл. № 29.
3. Патент России № 2181829, МКИ⁷ E 21 В 43/00, F 04 D 13/10. Способ вывода скважины, оборудованной установкой электроцентробежного насоса с частотно-регулируемым приводом, на стационарный режим работы / *В.М. Люстрицкий, С.А. Шишков* (Россия) // Оpubл. 27.04.2002, Бюл. № 12.
4. *Стариков В.А.* Автоматизация технологического процесса вывода скважины на стационарный режим работы после капитального ремонта: дис. ... канд. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2010. 137 с.
5. *Стариков А.В., Полежаев Д.Ю.* Вывод нефтяной скважины на стационарный режим работы без датчика динамического уровня // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2014. № 4 (44). С. 191–197.
6. *Костоломов Е.М., Шибанов С.В.* Результаты работы высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов насосных агрегатов перекачки нефти на объектах ОАО «Сургутнефтегаз» // Экспозиция Нефть Газ. 2009. № 5. С. 33–35.
7. *Стариков А.В., Живаева В.В., Полежаев Д.Ю.* Энергоэффективный подход к выбору оборудования установки погружного насоса // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2017. № 2 (54). С. 130–138.
8. *Стариков А.В., Табачникова Т.В., Казанцев А.А., Косорлуков И.А.* Алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2021. Т. 29. № 4. С. 116–131.
9. *Вечеркин М.В.* Разработка и исследование пускорегулирующих устройств высоковольтного электропривода вентиляторной станции: дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет, 2006. 119 с.
10. *Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I.* Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), IEEE Xplore, 2020. Pp. 1–5.
11. *Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В.* Основы управления режимами энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности: учеб. пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2010. 96 с.
12. *Аржанов М.Ф., Кагарманов И.И., Мельников А.П., Карпенко И.Н., Кравец Ю.А.* Справочник нефтяника. Самара: ОАО «Самаранефтегаз», 2007. 432 с.
13. ГОСТ Р 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ: дата введения 1995-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд. официальное. Минск: Стандартинформ, 1993. С. 20–21.
14. *Григорьев В.И., Киреева Э.А., Миронов В.А., Чохонелидзе А.Н., Григорьев В.В.* Справочная книга электрика: справ. издание. М.: Колос, 2004. 97 с.
15. *Тарасов В.П.* Энергосберегающий дизайн УЭЦН // Инженерная практика. 2010. № 3. С. 26–32.
16. Погружное оборудование и комплексный сервис // Технический каталог № 3. М.: Группа компаний «Римера», 2014. 203 с.
17. Трансформаторы ТМПГ-СЭЩ для питания погружных насосов нефти // Технический каталог. Самара: АО «ГК "Электрощит" – ТМ Самара», 2019. С. 11–13.
18. *Масляницын А.П.* Автоматизация технологического процесса добычи нефти погружными центробежными насосами: дис. ... канд. техн. наук. Самара: СамГАСА, 1999.

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2022 г.

JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF USE OF FREQUENCY CONVERTERS IN CONTROL STATIONS OF SUBMERSIBLE CENTRIFUGAL PUMPS

*A.V. Starikov, A.A. Kazantsev, I.A. Kosorlukov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: star58@mail.ru, kazantzev@63.ru, kosorlukov@gmail.com

Abstract. *The article considers the problem of determining the conditions under which the use of a frequency converter in a submersible pump control station leads to a reduction in electrical energy costs and becomes efficient from an energy point of view. Analytical expressions are given that allow calculating the specific costs of electrical energy during artificial lift oil production for the case when the operating mode and well flow rate are provided by wellhead choke throttling. At the same time, special attention is paid to determining the rotation speed of the submersible asynchronous motor, which ensures the required location of the operating point on the pump pressure characteristic. Formulas are also given that make it possible to calculate the specific costs of electrical energy during artificial lift oil production for the case when the operating mode and well flow rate are set by the frequency converter of the control station. An analytical expression has been found to determine the rotation speed and frequency of the supply voltage, which provide the required operating point of the pump with frequency regulation of the submersible motor. It is proposed, using the above analytical expressions, to use the iterative method to calculate the pump performance, at which the specific energy costs for the production of a cubic meter of liquid will be equal both in the case of using a frequency converter in the control station and without it. An example of calculating such a boundary value of pump performance for a hypothetical well is given. It is shown that a decrease in the required flow rate relative to the limiting value of the pump performance leads to a decrease in the specific consumption of electrical energy during artificial lift oil production in the case of using a frequency converter in the submersible pump control station.*

Keywords: *energy efficiency, submersible pump, submersible electric motor, specific power consumption*

REFERENCES

1. Zhivaeva V.V., Starikov A.V., Starikov V.A. The use of a frequency-controlled electric drive to bring the well to a stationary mode. Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences", No. 1 (23). 2009. Pp. 142–151.
2. Russian patent No. 2370673, MKI F04D 15/00, F04D 13/10. Control system for a submersible electric centrifugal pump / V.V. Zhivaeva, A.V. Starikov, V.A. Starikov (Russia) // Publ. 20.10.2009, Bull. No. 29.
3. Russian patent No. 2181829, MKI7 E 21 B 43/00, F 04 D 13/10. A method for bringing a well equipped with an electric centrifugal pump with a frequency-controlled drive to a stationary mode of operation / V.M. Lyustritsky, S.A. Shishkov (Russia) // Publ. 04/27/2002, Bull. No. 12.
4. Starikov V.A. Automation of the technological process of bringing the well to a stationary mode of operation after a major overhaul: dis. ... cand. tech. Sciences. – Samara: SamGTU, 2010. 137 p.

* Alexander V. Starikov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Kazantsev A. Andreevich, Senior Lecturer.
Kosorlukov I. Andreevich, Doctoral Student.

5. *Starikov A.V., Polezhaev D.Yu.* Conclusion of an oil well to a stationary mode of operation without a dynamic level sensor // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences", No. 4 (44). 2014. Pp. 191–197.
6. *Kostolomov E.M., Shibanov S.V.* The results of the work of high-voltage frequency-controlled electric drives of pumping units for pumping oil at the facilities of OJSC "Surgutneftegaz" // Exposition Oil Gas 5/H. 2009. Pp. 33–35.
7. *Starikov A.V., Zhivaeva V.V., Polezhaev D.Yu.* Energy-efficient approach to the choice of equipment for a submersible pump installation // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences", No. 2 (54). 2017. Pp. 130–138.
8. *Starikov A.V., Tabachnikova T.V., Kazantsev A.A., Kosorlukov I.A.* Algorithm for calculating the optimal value of the voltage of a commercial substation // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences", T. 29. No. 4. 2021. Pp. 116–131.
9. *Vecherkin M.V.* Development and research of ballasts for a high-voltage electric drive of a fan station: thesis of a candidate of technical sciences. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University, 2006. 119 p.
10. *Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I.* Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), IEEE Xplore, 2020. Pp. 1–5.
11. *Vainshtein R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V.* Fundamentals of power system mode control by frequency and active power, by voltage and reactive power: a tutorial. Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2010. 96 p.
12. *Arzhanov M.F., Kagarmenov I.I., Melnikov A.P., Karpenko I.N., Kravets Yu.A.* Oilman's Handbook. Samara: JSC "Samaraneftegaz", 2007. 432 p.
13. GOST R 28249-93. Short circuits in electrical installations. Calculation methods in electrical installations of alternating current with voltage up to 1 kV: introduction date 1995-01-01 / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Ed. official. Minsk: Standartinform, 1993. Pp. 20–21.
14. *Grigoriev V.I., Kireeva E.A., Mironov V.A., Chokhnelidze A.N., Grigoriev V.V.* Reference book of an electrician: a reference edition. M.: Kolos Publishing House, 2004. 97 p.
15. *Tarasov V.P.* Energy-saving design of ESP // Engineering Practice, No. 3, 2010. Pp. 26–32.
16. Submersible equipment and comprehensive service // Technical catalog No. 3. M.: Rimera Group of Companies, 2014. 203 p.
17. Transformers TMPG-SESH for powering submersible oil pumps // Technical catalogue. – Samara.: JSC "GK "Electroshield" – TM Samara", 2019. Pp. 11–13.
18. *Maslyanitsyn A.P.* Automation of the technological process of oil production by submersible centrifugal pumps: thesis of a candidate of technical sciences. Samara: SamGASA, 1999.

УДК 620.97, 621.331, 629.433, 629.085

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ГОРЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

*А.В. Кацай*¹, *М.В. Шевлюгин*²

¹ООО «Кинемак»

Россия, 115201, г. Москва, Каширский пр-д, 13, стр. 2

²Российский университет транспорта

Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

E-mail: proton764@mail.ru, mx_sh@mail.ru

***Аннотация.** Рассмотрена эффективность работы накопителей энергии стационарного и бортового исполнения в контактной сети горэлектротранспорта (трамвая, метро). Выведены коэффициенты полезного действия накопительных устройств в зависимости от полноты рассмотрения систем накопления и способов их применения. В соответствии с установленными формулами расчета разных типов КПД проанализирована эффективность отечественных накопителей энергии различного типа, примененных на горэлектротранспорте. Установлено, что при прочих равных характеристиках стационарные накопители энергии более эффективны, чем таковые бортового исполнения.*

***Ключевые слова:** накопитель энергии, накапливающий элемент, преобразователь, эффективность, потери энергии, типы КПД, контактная сеть ГЭТ, рекуперация, бортовое и стационарное применение*

Введение

В работе буферных накопителей энергии, как и любых иных устройств, имеются безвозвратные потери энергии с точки зрения ее полезного применения. Эти потери зависят как от типа накопителя энергии, так и от условий его применения, поскольку конфигурация сетей и место накопителя в них также сильно влияют на его эффективность. Целью настоящего исследования ставится выведение системы определения эффективности работы накопителей энергии различной структуры (управляемых и неуправляемых, с разными типами накопительных элементов) и различного применения (бортовых и стационарных) для обеспечения исследователей и потенциальных пользователей этих устройств действенным единым методическим инструментом для их сравнения. Кроме того, на основе полученной системы определения коэффициентов полезного действия накопителей необходимо определить эти показатели для устройств, испытания которых проводились в электрифицированном транспорте России.

Возможный КПД системы накопления энергии для ГЭТ

Системы накопления энергии (СНЭ) любого типа состоят из двух подсистем:

¹ Кацай Александр Владимирович, генеральный директор.

² Шевлюгин Максим Валерьевич, доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта».

– собственно энергонакапливающего элемента (НЭ), например химических ячеек, суперконденсаторов, маховика и т. п.;

– преобразователя энергии, который позволяет переводить сетевую электроэнергию в форму, соответствующую типу накапливающего элемента, при запасании ее и обратно, когда необходимо возвращать эту ранее накопленную энергию в электрическую сеть для потребления сетевой нагрузкой.

Для городского электротранспорта (ГЭТ) на текущий период наиболее актуальными являются три типа накопителей энергии – литиевые аккумуляторы, суперконденсаторы и маховичные накопители, которые по своим базовым параметрам – мощности и энергоемкости – соответствуют режимам работы этой сети – резко переменным. Поскольку у накопительного элемента за один полный цикл есть только три процесса – прием энергии, хранение и выдача, то сумма потерь энергии складывается из потерь на этих этапах. Так, по данным многих исследователей, например в [1], КПД цикла работы емкостного и суперконденсаторного накопителя зависит в наибольшей степени от времени хранения энергии в конденсаторе. Для разработанных до настоящего времени моделей конденсаторов и суперконденсаторов условие высокого КПД достижимо только для сравнительно коротких сроков хранения энергии и зависит от величины сопротивления утечке зарядов. Исходя из результатов анализа записей осциллограмм работы стационарных накопителей в ходе их испытаний – маховичного и емкостного – в контактных сетях соответственно трамвая и метро было установлено, что за рабочий день электротранспорта продолжительностью 17 часов количество циклов приема-выдачи избыточной энергии рекуперации на участках одной ТП составляло от 3000 до 4000. Средняя продолжительность одного цикла, включая этапы приема, хранения и выдачи энергии, составило 17,486 секунды. Для бортовых накопителей количество событий работы существенно меньше, т. к. они принимают и выдают только энергию своего вагона, а количество событий рекуперативного торможения вагона практически совпадает с количеством остановов в ходе выполнения перевозок – до 300–400 за рабочий день продолжительностью до 17 часов. Средняя продолжительность цикла работы накопителя определяется временами приема энергии при торможении вагона, хранения ее во время остановки и выдачи в период разгона и составляет порядка 60–90 секунд, из которых время хранения совпадает с чистым временем стоянки – до 60 секунд. С учетом вышеприведенных величин продолжительности циклов работы накопителей, в которых величина периода хранения энергии, когда происходит только саморазряд разных типов накопительных элементов, невелика, для упрощения рассмотрения на начальном этапе исследования модели применения накопителей можно принять предположение, что время хранения энергии в накопительном элементе минимально, т. е. что потери энергии на этом этапе работы равны нулю. В ходе дальнейшего разворачивания исследования потери энергии в накопительных элементах в период хранения, от которых мы в данный момент отвлекаемся, будут привлечены для определения полного эффекта от функционирования этих устройств. С учетом этого предположения объем потерь в накопительном элементе есть сумма потерь при приеме энергии и при выдаче энергии. КПД накопительного элемента, входящего в системы накопления энергии, рассчитывается по формуле

$$\eta_{\text{возм}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{НЭ}}}{E_{\text{зап}}^{\text{НЭ}}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{выд}}^{\text{нэ}}$ – энергия, выданная накопительным элементом в той форме, в какой он может выдавать ее в преобразовательное устройство СНЭ; $E_{\text{зап}}^{\text{нэ}}$ – энергия, полученная накопительным элементом от преобразовательного устройства СНЭ в той форме, в какой он может хранить ее.

Поскольку практически во всех современных накопителях энергии присутствует устройство преобразования энергии из той формы, в которой она выдается накопителем энергии, в ту форму и с теми параметрами, которые может принять контактная сеть ГЭТ, а без преобразователей накопительные системы практически не применяются, и поскольку в формуле (1) потери энергии в преобразователе еще не учитываются, то вычисляемый параметр по этой формуле назовем возможным КПД накопителя энергии ($\eta_{\text{возм}}$).

Основные потери при работе маховичного накопителя энергии образуются от воздушного трения вращающихся частей, потерь на трение в подшипниках, вибрационных и звуковых потерь, а также потерь тока на нагрев обмоток мотор-генератора как в режиме зарядки, так и в режиме выдачи запасенной энергии [7, 8]. При условии минимизации времени хранения энергии, так же как и у накопителей емкостного типа, КПД цикла работы маховичного накопительного элемента (состоящего из маховика и мотор-генератора) ($\eta_{\text{возм}}^{\text{max}}$) имеет довольно высокие значение, достигая уровня этого показателя в 0,98–0,99 при высоких мощностях обмена энергией.

Основные потери в цикле работы аккумуляторного накопителя энергии выражаются в нагреве электрохимических ячеек и некоторых других явлениях. Причем активные потери происходят как в процессе зарядки аккумулятора, так и в процессе его разрядки на полезную нагрузку. Т. е. электрические потери в таких накопителях необходимо за один цикл учитывать дважды, как, впрочем, в любых типах накопителей энергии. Т. к. в качестве буферных накопителей энергии аккумуляторы практически не применяются (в подвижном составе с удлиненным автономным ходом они используются как дополнительный вторичный источник питания, а не как быстродействующий буферный накопитель), то далее аккумуляторные технологии мы рассматривать не будем.

Основные потери в емкостном накопителе (конденсатор, суперконденсатор) происходят от саморазряда при хранении. На рис. 1 показаны значения зарядных и разрядных энергий емкостного неуправляемого накопителя энергии (ЕНЭ) в течение суток, а также его возможный КПД (верхняя черная линия), который в среднем за сутки составил 95 %. Данный накопитель проработал длительное время на тяговой подстанции Т-23 филевской линии московского метрополитена [6].

Так как эксплуатационные службы предприятий ГЭТ интересуют характеристики действующих устройств, состоящих из накопительных элементов и преобразователей энергии, а не их отдельных частей, то для понимания свойств накопительных систем важны энергетические показатели полной системы СНЭ, а не только отдельной, хотя и важнейшей его части. Как правило, этот промежуточный показатель – возможный КПД – мало их интересует, т. к. не раскрывает полной картины эффективности устройства. Обычно этот показатель возможного КПД приводится исследователями и разработчиками накопителей энергии на стадии изучения параметров накопительных элементов. Исключением служат

неуправляемые накопители, у которых преобразователя энергии нет, как в случае с емкостным накопителем в описании к рис. 1.

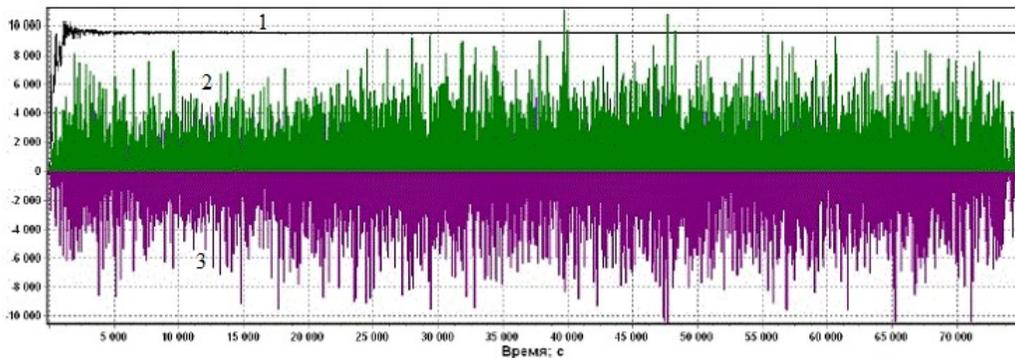


Рис. 1. Энергии заряда и разряда ЕНЭ, а также возможное КПД в функции времени за сутки. Ось абсцисс – секунды. Ось ординат – 1 – КПД емкостного аккумуляторного накопителя * 10 000; 2 – энергия зарядки накопителя, 3 – энергия, выданная накопителем

Действительный КПД системы накопления энергии для ГЭТ

Более полную характеристику эффективности СНЭ дает интегральный показатель КПД для обобщенного режима эксплуатации накопителя, учитывающий потери энергии не только в накопительном элементе, но и в преобразующем устройстве. Как правило, в современных системах управления накопителями электроэнергии используются силовые электронные устройства на IGBT транзисторах. Полный КПД таких преобразователей достаточно высок в силу малых потерь в силовых транзисторах и небольшого энергопотребления драйверами этих элементов. Инверторы применяются с одним, двумя или тремя ступенями преобразования, с различными типами транзисторов, драйверов, конденсаторов, топологией электрических схем и другими особенностями. Однако уровень потерь в таких системах относительно невелик. Для накопителей энергии с накопительными элементами разных типов (суперконденсаторные, электрохимические, электромеханические (маховичные)) применяются инверторы со схожими характеристиками, в т. ч. одних и тех же производителей, и для целей настоящего исследования с небольшими допущениями можно принять, что этот показатель примерно одинаков. Обычно производители преобразователей указывают КПД для направленности преобразования энергии только в одну сторону. Примем также допущение, что эффективность преобразовательного устройства, где энергия циркулирует в обе стороны, одинакова в обе стороны его работы (как на накопительный элемент, так и на сеть). Поскольку инвертор в накопителе для ГЭТ есть обратимое устройство, т. е. он может как получать энергию из сети, так и выдавать ее в сеть, то полный КПД преобразователя за один цикл ($\eta_{\text{цикл}}^{\text{преобр}}$) будет равен произведению этих коэффициентов при прямом ($\eta_{\text{прям}}^{\text{преобр}}$) и обратном преобразованиях ($\eta_{\text{обрат}}^{\text{преобр}}$):

$$\eta_{\text{цикл}}^{\text{преобр}} = \eta_{\text{прям}}^{\text{преобр}} * \eta_{\text{обрат}}^{\text{преобр}} . \quad (2)$$

Поскольку система накопления энергии, состоящая из накопительного элемента и преобразовательного устройства, есть функционально завершённое действующее в сети устройство, то интегральный КПД ее будем называть действи-

тельным КПД ($\eta_{\text{действ}}$). Действительный КПД системы накопителя энергии с учетом его работы на прием и на выдачу энергии рассчитывается как связка этих параметров в процессе заряда и в процессе разряда накопительного элемента. За один цикл СНЭ накопительный элемент совершает два процесса работы по приему и выдаче энергии, так же как и преобразовательное устройство – два процесса за один цикл: прием из сети с выдачей на накопительный элемент и прием от накопительного элемента с выдачей в сеть. С учетом этого действительный КПД СНЭ за один цикл работы выражается в формуле

$$\eta_{\text{действ}} = \eta_{\text{возм}} * \eta_{\text{цикл}}^{\text{преобр}}. \quad (3)$$

Поскольку значение КПД любого устройства меньше единицы, то очевидно, что возможная эффективность больше, чем действительная эффективность накопителя:

$$\eta_{\text{действ}} < \eta_{\text{возм}} < 1. \quad (4)$$

Действительный КПД накопителя энергии за период работы устройства, например рабочий день, неделю, месяц и т. д., достаточно легко выяснить инструментально, установив на входе в преобразователь двунаправленный счетчик электроэнергии. В этом случае показатель по формуле (3) рассчитывается непосредственно из значений таким образом установленного счётчика по запасенной энергии ($E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}}$) и выданной энергии ($E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}$) для функционально полного накопителя, состоящего из накопительного элемента и преобразователя:

$$\eta_{\text{действ}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}}}. \quad (5)$$

Для уже упомянутого емкостного неуправляемого накопителя энергии ЕНЭ, образец которого испытывался на тяговой подстанции московского метрополитена [6], значения возможного и действительного КПД совпадают, поскольку преобразовательный элемент у него отсутствует:

$$\eta_{\text{возм}}^{\text{снэ}} = \eta_{\text{действ}}^{\text{снэ}} \sim 0,95.$$

Большое значение действительного КПД неуправляемого емкостного накопителя энергии объясняется двумя факторами: а) отсутствием преобразователя энергии; б) малой долей использования полного объема энергоемкости, из которой в работе на прием и выдачу энергии избыточной рекуперации участвует максимум 5–10 процентов. Другими словами, неуправляемые накопители энергии недоиспользуют свою энергоемкость, что служит одним из главных их недостатков, при этом обеспечивая высокий КПД, что является преимуществом при работе в КС ГЭТ.

Реальный КПД системы накопления энергии для ГЭТ

Однако основной функциональный набор СНЭ при эксплуатации в контактной сети дополняется другими функциями, необходимыми для реальной работы устройства. Например, следует упомянуть такие подсистемы собственных нужд накопительного устройства, как система мониторинга основных параметров накопительных элементов, система климат-контроля с охлаждающими/нагревательными элементами, система управления, питание драйверов транзисторов и др., которые потребляют энергию из КС. Эта энергия расходуется безвозвратно и непосредственно в выполнении работы СНЭ не участвует. Указанные затраты энергии производятся постоянно во все время работы накопителя

энергии, в т. ч. и в периоды, когда прием или выдача энергии отсутствуют – т. е. в периоды хранения.

Само накопительное устройство довольно редко устанавливается непосредственно в контактную сеть. Так, в схеме подключения бортового накопителя может присутствовать сглаживающий фильтр, преобразователь собственных нужд, питающий системы собственных нужд накопительного устройства. Кроме того, в каждом накопительном устройстве реализована функция климат-контроля, например в виде воздушных или жидкостных охлаждающих систем, которые потребляют энергию другого напряжения, чем силовой контур накопителя. Возможны и другие управляющие и исполнительные устройства, потребляющие энергию для обеспечения основного процесса по запасанию и выдаче энергии.

Способ определения этих затрат может быть реализован как инструментально (установить счетчик энергии на входе этих энергопотребляющих систем), так и аналитически. Последнее также довольно просто устанавливается, если известна средняя мощность потребления указанных систем и время работы СНЭ, например за рабочий день, месяц, год и т. д. Поскольку эти потери условно постоянны, а выработка накопителя энергии может меняться в связи с дорожной обстановкой, сезоном и др. внешними факторами в КС ГЭТ, то доля потерь на собственные нужды в общей структуре потерь энергии в СНЭ может существенно меняться и при этом абсолютное значение потерь может меняться не столь значительно, и наоборот.

Сумма реальных затрат энергии на обеспечение работы накопителя ($E_{\text{обесп}}$) и запасенной для хранения в накопителе энергии ($E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}}$) есть величина общего реального потребления энергии СНЭ ($E_{\text{реал}}$):

$$E_{\text{реал}} = E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}} + E_{\text{обесп}}. \quad (6)$$

Формула действительного КПД (5) с учетом дополнительных затрат энергии на обеспечение работы накопителя (6) модифицируется в формулу реального КПД:

$$\eta_{\text{реал}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{реал}}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}} + E_{\text{обесп}}}. \quad (7)$$

Наилучшим способом определения доли и абсолютного объема потерь накопителя является его длительная работа в реальных условиях, когда можно определить двунаправленным счетчиком объемы всей входной и выданной энергии, отношение которых и определяет реальное КПД такого устройства по формуле (7). Для бортового накопителя энергии с учетом двух цепей питания – силовой и управляющей – инструментально определить значение $E_{\text{реал}}$ труднее, т. к. эти цепи питаются разным напряжением и необходимо устанавливать два счетчика энергии. Реализация наилучшего способа представляется следующим образом: накопительный агрегат со всеми системами собственных нужд имеет только один ввод энергии, по которому и осуществляется ее подвод для силовой цепи и для цепей управления-контроля и вывод для силовой цепи. Например, стационарный буферный накопитель энергии НКЭ-3Г устроен именно таким образом, поскольку питание собственных нужд агрегата осуществляется при помощи статического преобразователя, подключенного к вводу контактной сети после счетчика энергии.

Что касается упомянутого неуправляемого емкостного накопителя ЕНЭ, работавшего на ТП московского метро, то реальные расходы собственных нужд оказались существенно ниже, чем ожидалось при планировании этих испытаний. Ожидались существенные расходы на вентиляцию накопительных модулей, однако тепловые потери конденсаторных модулей оказались незначительными в силу малого использования полной энергоемкости, и вентиляторы практически не включались. Таким образом, все затраты на собственные нужды свелись к питанию сигнальных диодных ламп на панелях, микрочипов в модулях диагностики и передачи сигналов, а также к питанию общего компьютера. Итоговая нагрузка собственных нужд составила максимум 0,6 кВт на всю систему, расход энергии не превышал в сутки 15 кВт·час.

Фактический КПД накопителей в контактной сети ГЭТ

Однако перечисленные в формуле (6) потери и расход энергии для СНЭ не исчерпывают все энергозатраты таких агрегатов. Для накопителя бортового исполнения прибавляется еще один дополнительный источник потерь энергии, вызванный необходимостью постоянной перевозки этого устройства во все время работы вагона, на котором он установлен ($E_{\text{трансп}}$). С учетом этого элемента затрат перечислены все фактические потери и затраты энергии у накопителя:

$$E_{\text{факт}} = E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}} + E_{\text{обесп}} + E_{\text{трансп}} \cdot \quad (8)$$

С учетом затрат энергии на транспортировку (8) реальный КПД (7) модифицируется в формулу фактического КПД:

$$\eta_{\text{факт}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{факт}}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}} + E_{\text{обесп}} + E_{\text{трансп}}} \cdot \quad (9)$$

Отметим, что для стационарного накопителя энергии любого типа значение $E_{\text{трансп}}$ равно нулю, т. к. он не перевозится, и формула (9) совпадает с формулой (7). Для бортового накопителя энергии все составляющие формул (8) и (9) – ненулевые.

Сравнение фактического КПД стационарного и бортового накопителей энергии показывает, что при условии равенства основных характеристик (энергоемкости, мощности, потерь в накопительном элементе и в преобразователе, а также затрат энергии на системы собственных нужд) эффективность бортового накопителя всегда будет ниже, чем у стационарного:

$$\eta_{\text{факт}}^{\text{стационар}} > \eta_{\text{факт}}^{\text{бортов}} \cdot \quad (10)$$

что очевидно, поскольку фактические затраты энергии у такого бортового накопителя всегда будут больше на энергозатраты для его перевозки $E_{\text{трансп}}$.

Определение фактического КПД ($\eta_{\text{факт}}$) накопителя энергии бортового и стационарного исполнения является одной из базовых задач проведения их испытаний в условиях опытной эксплуатации.

Экспериментальные исследования фактического КПД накопителей

В последние годы в городском электротранспорте России были проведены опытные эксплуатации следующих типов буферных накопителей энергии: суперконденсаторный бортовой (АО «Синара-Транспортные машины» – ООО «Чергос», трамвай), емкостной стационарный (ЗАО «Элтон», метрополитен), маховичный стационарный (ООО «Кинемак», трамвай). На основании име-

ющихся данных о проведенных испытаниях появилась возможность оценить эффективность работы перечисленных типов агрегатов.

КПД бортового суперконденсаторного накопителя без межпоездного обмена

Суперконденсаторный накопитель (СКН) был установлен на борту трамвайного вагона на крыше. Электрическая схема работы накопителя обеспечивала прием всей доступной энергии при рекуперативном торможении вагона, не позволяя выдавать полезную энергию рекуперации в контактную сеть. Выдача энергии производилась при разгоне вагона на тяговые преобразователи тележек.

В материалах научно-технического совета Международной ассоциации предприятий городского электротранспорта (МАП ГЭТ) [9] приведен показатель действительного КПД данного СКН $\eta_{\text{действ}}^{\text{СКН}} = 0,684$ (т. е. без учета потребления собственных нужд накопительного устройства и затрат энергии на его перевозку).

Так как данные по потреблению систем собственных нужд суперконденсаторного блока и блока управления не приводятся, то оценим этот показатель условно по аналогии с близкими по функционалу устройствами (преобразователи инверторные и блоки суперконденсаторов). Так, среднечасовая мощность потребления всех систем, работающих на обеспечение функционирования суперконденсаторного накопителя мощностью 100 кВт, состоит из мощности работы: питающих эти устройства бортовых статических преобразователей энергии, систем управления СКН (накопительного элемента и частотного преобразователя), систем климат-контроля и охлаждения, а также некоторых иных и не может для агрегата такой мощности быть менее 2–3 кВт (2–3 %). Примем среднее значение 2,5 кВт. За 17-часовой рабочий день вагона на обеспечение работы одного бортового накопителя энергии ($E_{\text{обесп}}^{\text{СКН}}$) будет израсходовано из контактной сети порядка 42,5 кВт·час.

Поскольку как балластный груз бортовой СКН добавляется к массе тары вагона, то для расчета потерь по статье затрат на перевозку ($E_{\text{трансп}}^{\text{СКН}}$) может применяться типовая отраслевая методика расчета энергопотребления вагоном (см., например, [10]). В таких методиках для каждого типа подвижной единицы рассчитывается свой коэффициент потерь на сопротивление движению вагона, в котором учитывается масса и пробег тары (см., например, таблицу 2.1 в Приложении 2 в [10]). Поскольку для каждой единицы ЭПС известен ее пробег (за сутки, месяц, год) и для накопителя известна его масса, то расчет транспортных потерь энергии на перевозку бортового накопителя ($E_{\text{трансп}}^{\text{СКН}}$) делается просто. Например, для трамвайного вагона типа 71-631 технологические нормы расхода электроэнергии на электротягу составляют 85 кВт·час/1000 ткм при базовой средней эксплуатационной скорости $V_{\text{зо}} = 15$ км/ч [10]. При установке бортового суперконденсаторного накопителя массой в 1 тонну на такой вагон объем затрат энергии на тягу для его перевозки за день, когда суточный пробег вагона равен 200 км (т. е. за сутки показатель перевозки такого бортового накопителя равен 200 ткм), составляет $E_{\text{трансп}}^{\text{СКН}} = 17$ кВт·час. С учетом показателей в [10], средней массы вагона 32,5 т и пробега 200 км в день, а также коэффициента потерь при

тяге в 1,4 и вышеприведенного $\eta_{\text{действ}}^{\text{СКН}}$, фактический КПД суперконденсаторного бортового накопителя энергии составит

$$\eta_{\text{факт}}^{\text{СКН}} = 0,594 . \quad (11)$$

В год затраты энергии только на перевозку одной такой суперконденсаторной СНЭ при условии ежедневной равной транспортной работы вагона будут равны 6205 кВт·час, а на собственные нужды СКН – 15512 кВт·час. Причем эти годовые затраты энергии на обеспечение работы и перевозку СКН суммарно в объеме 21717 кВт·час будут производиться не из возвращенной на полезную работу избыточной рекуперации вагона, а из контактной сети, т. е. от тяговой подстанции.

КПД бортового суперконденсаторного накопителя с межпоездным обменом

Также в нашей стране были произведены теоретические расчеты бортового суперконденсаторного накопителя энергии, который отличается от предыдущей конструкции тем, что позволяет производить межпоездной обмен рекуперированной при торможении вагона энергией, а энергию избыточной рекуперации запасает, хранит до возникновения тягового энергопотребления своего вагона и выдает на его тягу при появлении такой возможности [11]. На основе построения такой теории был сделан опытный образец указанного накопителя и проведены его тестовые испытания там же, в СПб горэлектротранспорте на трамвайном вагоне. Касательно энергоемкости такого накопителя следует отметить, что она совпадала с энергоемкостью накопителя для варианта с отсутствием прямого межпоездного обмена энергией рекуперации (МПО), поскольку последняя является явлением случайным и накопитель для полной утилизации избыточной рекуперации должен иметь возможность принять в себя всю энергию рекуперативного торможения при отсутствии потенциала межпоездных перетоков энергии рекуперации. В расчетах такого буферного бортового накопителя была указана его полная энергоемкость – 5,7 МДж [там же], что близко к значению емкости суперконденсаторного накопителя для варианта его работы без возможности межпоездного обмена. Последнее означает, что габариты и масса обоих вариантов суперконденсаторных бортовых накопителей будут практически идентичными.

Поскольку все остальные условия работы подвижного состава в этих случаях одинаковы, то расчет значений типов КПД для процессов возврата энергии рекуперации при использовании бортового суперконденсаторного накопителя, разрешающего межпоездной обмен полезной рекуперацией, рассчитывается по аналогии с вариантом для бортового накопителя без наличия такой возможности.

Согласно расчетам в [11], объем полезной энергии рекуперации, ушедшей в КС по межпоездному обмену, составляет порядка 30 процентов от объема затраченной на тягу вагона потребленной энергии. Объем избыточной рекуперации составил порядка 33 % от потребления на тягу. Состав оборудования суперконденсаторного накопителя с возможностью межпоездного обмена полезной энергии рекуперации – такой же, как и в выше рассмотренном варианте без такой возможности. Особенностью же является возможность обеспечения межпоездных перетоков рекуперации, что определяет только меньший, практически вдвое, абсолютный объем энергии. Однако абсолютные объемы преобразуемой энергии рекуперации в процессе определения характеристик самого рассматриваемого оборудования не участвуют, нам важны только характеристики самого оборудования. А эти характеристики определяются соответствующими показателями

подсистем: накопительных элементов и преобразователей, а также системы управления и контроля накопителя.

Поскольку все подсистемы – идентичные, то мы можем заключить, что все четыре показателя эффективности бортового суперконденсаторного накопителя с возможностью реализации межпоездного обмена полезной рекуперацией (возможный, действительный, реальный и фактический КПД) будут такими же, что и у накопителя без наличия такой возможности.

КПД стационарного маховичного накопителя

Маховичный буферный накопитель энергии типа НКЭ-3Г подключается непосредственно к контактной сети ГЭТ и имеет счетчик входной и выходной энергии (рис. 2). При этом счетчик энергии установлен на единственном входе контактной сети в цепи питания всех подсистем до сетевого рубильника. Испытания агрегата проводились в трамвайных системах городов Коломна и Санкт-Петербург, общая наработка устройства превысила 5500 моточасов.



Рис. 2. Маховичный накопитель энергии НКЭ-3Г и его шкаф управления с двунаправленным счетчиком энергии СКВТ-Ф610

То есть такая схема учета позволила определить реальный (то же самое для стационарных – фактический) КПД агрегата. Длительная, в течение практически года, его эксплуатация в КС ГЭТ показала следующие результаты: среднесуточный реальный КПД агрегата зимой, когда, казалось бы, возникают лучшие условия для охлаждения греющихся частей агрегата, снижается до 59–60 %, а летом поднимается до 65–66 %. Также весьма велики колебания реального КПД внутри суток (рис. 3). Такие изменения реального КПД для стационарных накопителей ($\eta_{\text{реал}}^{\text{стационар}}$) объясняются тем, что в зимний период в связи с наличием в КС значительной нетяговой нагрузки практически все время осуществления транспортной работы подвижным составом объем избыточной энергии рекуперации вагонов

снижается и буферный накопитель энергии работает на прием избыточной рекуперации меньше, чем в теплый сезон, когда нетяговая нагрузка в сети резко снижается. В теплое время года нетяговая нагрузка в КС горэлектротранспорта имеет значительно меньшую мощность, количество избыточной рекуперации существенно растет, увеличивается и число событий выдачи избыточной рекуперации. Тем самым хотя и увеличиваются потери энергии в переходных процессах в накопителе (во время зарядки и разрядки), однако быстрее вырастает общий объем выданной и также принятой энергии и снижается продолжительность периодов хранения энергии на выбеге.

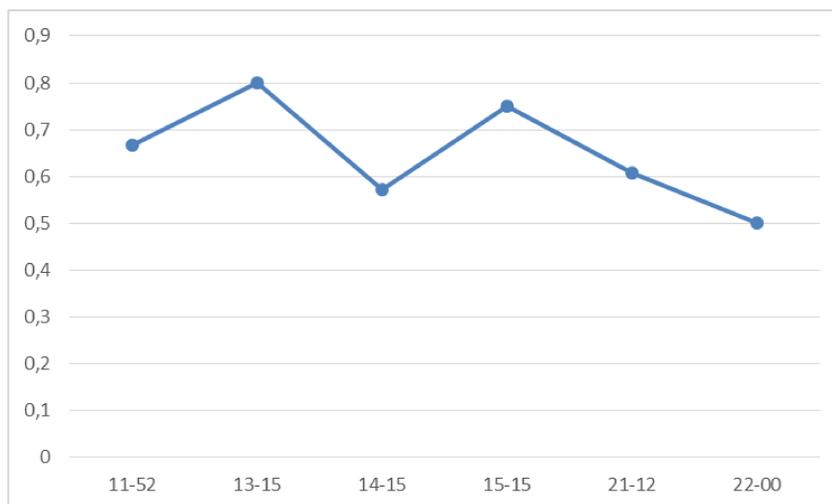


Рис. 3. График значений реального КПД маховичного накопителя энергии НКЭ-3Г $\eta_{\text{реал}}^{\text{НКЭ}}$, вычисленных по результатам замеров входной и выходной энергии двунаправленным счетчиком в течение одного дня по часовым интервалам (на оси абсцисс указано время начала замера часового интервала). Данные получены с применением двунаправленного счетчика постоянного тока типа СКВТ-Ф610, широко применяемого в ГЭТ России

КПД стационарного неуправляемого емкостного накопителя

Согласно данным испытаний стационарного неуправляемого емкостного накопителя энергии на тяговой подстанции Т-23 московского метрополитена значение среднего действительного КПД составило порядка 0,955 [6]. Величина была получена путем прямого измерения входящей и выходящей энергии за длительный, в несколько месяцев, период испытаний.

Потребление энергии на собственные нужды ЕНЭ производилось системой внутренней вентиляции модулей, системой диагностики накопительных элементов, системой управления и др. В соответствии с техническим заданием на накопитель он должен затрачивать на свое функционирование не более 3 % от мощности процессов возвращения в тяговую сеть ранее запасенной энергии избыточной рекуперации. При этом следует учитывать, что мощность собственных нужд затрачивается постоянно во все время подключения накопителя к сети.

Средняя мощность разряда устройства составляла до 300 кВт. Средняя мощность собственных нужд составляла до 0,6 кВт. Следовательно, на собственные

нужды устройства за один день потреблялось не более 15 кВт·час электроэнергии.

С учетом гораздо большего объема энергии рекуперации (в данном случае – только избыточной рекуперации) в тяговой сети метрополитена в сравнении с тяговой сетью трамвайного движения фактический (он же равен реальному) КПД емкостного накопителя энергии, исходя из вышеприведенного значения действительного КПД ($\eta_{\text{действ}}^{\text{ЕНЭ}}$) и затрат энергии на собственные нужды, должен иметь значение $\eta_{\text{факт}}^{\text{ЕНЭ}} \approx 0,94$. Высокое значение эффективности для неуправляемого ЕНЭ может быть объяснено тем, что у него отсутствуют двойные потери в преобразователе энергии, которого у него нет. К недостаткам неуправляемого емкостного накопителя энергии следует отнести то, что у него гораздо меньший полезный (рабочий) объем энергоемкости от общей емкости накопительных элементов, чем у управляемых накопителей (до 10 % против 96–98 % соответственно). Это означает, что большая часть энергоемкости не участвует в полезной работе неуправляемого ЕНЭ.

В сводной таблице представлены коэффициенты полезного действия накопителей энергии, проанализированных в настоящем исследовании.

Коэффициенты полезного действия накопителей энергии, испытанных в российском городском электротранспорте

Тип накопителя	Место размещения	$\eta_{\text{возм}}$	$\eta_{\text{действ}}$	$\eta_{\text{реал}}$	$\eta_{\text{факт}}$
СКН без МПО	Борт трамвая	0,98	0,684	нд	0,594
СКН с МПО	Борт трамвая	0,98	0,684	нд	0,594
ЕНЭ	КС метро	0,95	0,95	0,94	0,94
НКЭ-3Г	КС трамвая	0,95–0,98	нд	0,63	0,63

Полученные данные в ходе практической эксплуатации и теоретических расчетов на их основе показывают, что все варианты исполнения бортовых суперконденсаторных накопителей энергии имеют существенно меньшие показатели коэффициентов полезного действия, определенных для полной системы накопителя, нежели КПД стационарных буферных накопительных агрегатов емкостного и маховичного типов.

Выводы

Системы накопления энергии в зависимости от состава оборудования могут иметь показатели коэффициентов полезного действия в зависимости от полноты их рассмотрения: возможный (только накопительный элемент), действительный (накопительный элемент и преобразователь), реальный (дополнительно учитываются расходы на собственные нужды СНЭ) и фактический (дополнительно учитывается расход энергии на перевозку накопителя).

Фактический КПД накопительного агрегата для сетей ГЭТ учитывает потери в силовом цикле, затраты энергии на работу систем собственных нужд, а также на перевозку устройства (в случае бортового исполнения).

У накопителей бортового исполнения ко всем прочим потерям энергии в ходе их функционирования добавляются затраты сетевой энергии, необходимые для их перевозки в качестве балластного груза.

У стационарных накопителей затраты энергии на перевозку отсутствуют.

Неуправляемые накопители энергии имеют более высокий фактический КПД в силу отсутствия в конструкции инверторных преобразователей.

Отношение полезного рабочего объема накопителя к его полной энергоемкости выше у управляемых накопителей энергии.

Определение указанных видов КПД для накопителя энергии в ГЭТ является одной из главных задач при его опытной эксплуатации.

Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод, что его цель достигнута, выведены формулы и принципы расчета всех видов коэффициентов полезного действия накопителей энергии, начиная от рассмотрения только лишь этих коэффициентов для накопительных элементов этих устройств без учета других видов потерь и затрат энергии в процессе их работы и заканчивая знанием КПД с полным учетом всех затрат и потерь. В качестве примеров определения этих коэффициентов привлечены данные по фактически испытанным в ГЭТ России накопительным устройствам стационарного и бортового исполнения, управляемых и неуправляемых.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Радченко Р.В., Тюльпа В.В.* Термодинамический анализ эффективности использования суперконденсаторов в накопителях энергии // Электроприводы переменного тока: Материалы 17-й международной научно-технической конференции. 2018. С. 64–66.
2. *Деньщиков К.К., Жук А.З.* Гибридный накопитель электроэнергии на базе аккумуляторов и суперконденсаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://teenfor.org/upload/files/0513ec7730984747969d9bb8041d441b.pdf> 21.07.2022.
3. *Деньщиков К.К., Жук А.З.* Гибридный накопитель электроэнергии мегаваттного диапазона // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность, 2016: Материалы Международного конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность», Сколково, 13–14 октября 2016 года / Под ред. *Д.О. Дуникова, О.С. Попеля.* Сколково: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук», 2016. С. 129–135.
4. *Деньщиков К.К., Жук А.З., Фортвов В.Е., Шейндлин А.Е.* Гибридный накопитель электроэнергии // Энергия: экономика, техника, экология. 2015. № 2. С. 2–10.
5. *Бердников Р.Н., Фортвов В.Е., Сон Э.Е.* [и др.] Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети. 2013. № 2(7). С. 40–51.
6. *Баранов Л.А., Гречишников В.А., Еришов А.В., Родионов М.Д., Шевлюгин М.В.* Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях московского метрополитена // Электротехника. 2014. № 8. С. 18–21.
7. *Гулиа Н.В.* Маховичные двигатели. М., Машиностроение. 1976. 46 с.
8. *Гулиа Н.В.* Инерционные аккумуляторы энергии. Изд. 2-е, стереотип. М.: ЛЕНАНД. 2021. 240 с.
9. *Чернигов В.М.* Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (Дата обращения 22.07.2022).
10. Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. Приложение к распоряжению Минтранса России от 18 апреля 2013 г. № НА-37-р.
11. *Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Агунов А.В., Третьяков А.В.* Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава // Электротехника. 2018. № 10. С. 55–59.

Статья поступила в редакцию 21 августа 2022 г.

EFFICIENCY COEFFICIENTS OF THE ENERGY STORAGE DEVICE IN THE CONTACT NETWORK OF THE CITY ELECTRIC TRANSPORT

*A.V. Katsay*¹, *M.V. Shevlyugin*²

¹ Kinemak LLC,

13 Kashirsky Proezd, Moscow, 115201, Russian Federation

² Russian University of Transport

9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

E-mail: proton764@mail.ru, mx_sh@mail.ru

Abstract. *The efficiency of stationary and on-board energy storage devices in the contact network of mountain electric transport (tram, metro) is considered. The efficiency coefficients of storage devices are derived depending on the completeness of consideration of storage systems and methods of their application. In accordance with the established formulas for calculating different types of efficiency, the operation indicators of domestic energy storage devices of various types on mountain electric transport are analyzed. It has been established that, other things being equal, stationary energy storage devices are more efficient than those of the on-board version.*

Keywords: *energy storage, accumulating element, converter, efficiency, energy losses, efficiency types, GET contact network, recovery, on-board and stationary applications.*

REFERENCES

1. *Radchenko R.V., Tulpa V.V.* Thermodynamic analysis of the efficiency of using supercapacitors in energy storage // AC electric drives 2018. Pp. 64–66.
2. *Denshchikov K.K., Zhuk A.Z.* Hybrid electric power storage based on batteries and supercapacitors. <http://reenfor.org/upload/files/0513ec7730984747969d9bb8041d441b.pdf> 21.07.2022
3. *Denshchikov K.K., Zhuk A.Z.* Hybrid electric power storage of megawatt range // Renewable energy XXI century: Energy and Economic Efficiency, 2016: Proceedings of the International Congress REENCON-XXI "Renewable Energy XXI century: Energy and economic efficiency", Skolkovo, October 13-14, 2016 / Edited by *D.O. Dunikov, O.S. Popel*. Skolkovo: Federal State Budgetary Institution of Science United Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 2016. Pp. 129–135.
4. *Denshchikov K.K., Zhuk A.Z., Fortov V.E., Sheindlin A.E.* Hybrid electric power storage // Energy: economics, technology, ecology. 2015. No. 2. Pp. 2–10.
5. *Berdnikov R.N., Fortov V.E., Son E.E.* [et al.] Hybrid electric power storage for UNES based on batteries and supercapacitors // Energy of the unified grid. 2013. № 2(7). Pp. 40–51.
6. *Baranov L.A., Grechishnikov V.A., Ershov A.V., Rodionov M.D., Shevlyugin M.V.* Performance indicators of a stationary energy storage device at traction substations of the Moscow metro // Electrical Engineering. 2014. No. 8. Pp. 18–21.
7. *Gulia N.V.* Flywheel engines. M.: Mechanical Engineering. 1976. 46 p.
8. *Gulia N.V.* Inertial energy accumulators. 2nd edition, stereotype. M.: LENAND. 2021. 240 p.
9. *Chernihiv In.M.* Electrical equipment of a tram car with a capacitive storage device. http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (Access to the resource 22.07.2022).
10. Methodological recommendations for calculating the economically reasonable cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban traffic by road and urban ground electric public transport. Appendix to the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. NA-37-r dated April 18, 2013.

¹ *Alexander V. Katsay, General Director.*

² *Maxim V. Shevlyugin, (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor*

11. *Sharikov V.A., Sharkova O.L., Agunov A.V., Tretyakov A.V.* Possibilities of rational use of braking energy of electric rolling stock // *Electrical engineering*. 2018. No. 10. Pp. 55–59.

УДК 621.3.07

УПРАВЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ФУНКЦИИ МОЩНОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И ПОТЕРЬ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

В.И. Котенев, А.В. Котенев, А.Д. Стулов*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ads260391@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения предприятия, в составе которой одна часть трансформаторных подстанций оснащена регулируемыми конденсаторными установками, а вторая – нет. Показаны ее преимущества по сравнению с системой управления коэффициентом мощности: во-первых, более низкие требования к ее погрешности; во-вторых, учет отношения реактивной энергии к активной при расчете потребителя с поставщиком за электроэнергию. Дана оценка погрешности регулирования коэффициента реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторов главной понизительной подстанции, где установлены расчетные счетчики, при стабилизации коэффициента реактивной мощности на стороне низшего напряжения этих трансформаторов. Рассмотрен синтез системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности, построенной в функции мощности потребителей и потерь мощности в трансформаторах, и выполнена оценка ее погрешности. Предложенная система управления предназначена для систем электроснабжения с комбинированной нагрузкой, применение которой позволит потребителю избежать штрафных коэффициентов к тарифу за активную электроэнергию, а в конечном итоге понизит потери при транспортировке электроэнергии и повысит пропускную способность электрической сети.

Ключевые слова: система управления, реактивная мощность, электроснабжение, погрешность, оценка

Введение

Совершенствование систем автоматического управления (САУ) реактивной мощностью (РМ) систем электроснабжения (СЭС) позволяет в некоторой степени понизить потери мощности и напряжения в ее элементах, а также повысить коэффициент полезного действия питающих трансформаторов и тем самым обеспечить работу предприятия с требуемым значением коэффициента РМ, что относится к актуальным проблемам в энергетике.

* Котенев Виктор Иванович, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», доктор технических наук, профессор.
Котенев Александр Викторович, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», кандидат технических наук, доцент.
Стулов Александр Дмитриевич, аспирант.

Разработке таких систем управления уделяется достаточно большое внимание в печатных изданиях в нашей стране [1–12] и за рубежом [13–20].

К недостаткам существующих систем управления можно отнести низкую точность регулирования коэффициента РМ на стороне высшего напряжения (ВН) трансформаторов главной понизительной подстанции (ГПП) при требуемой стабилизации коэффициента РМ на стороне низшего напряжения (НН) и нестабильности мощности нагрузок цеховых электроприемников.

Цель работы – оценка погрешности существующих САУ и построение более совершенной системы управления коэффициентом РМ, где установлены расчетные счетчики электрической энергии.

Функциональная схема САУ коэффициентом РМ СЭС предприятия показана на рис. 1.

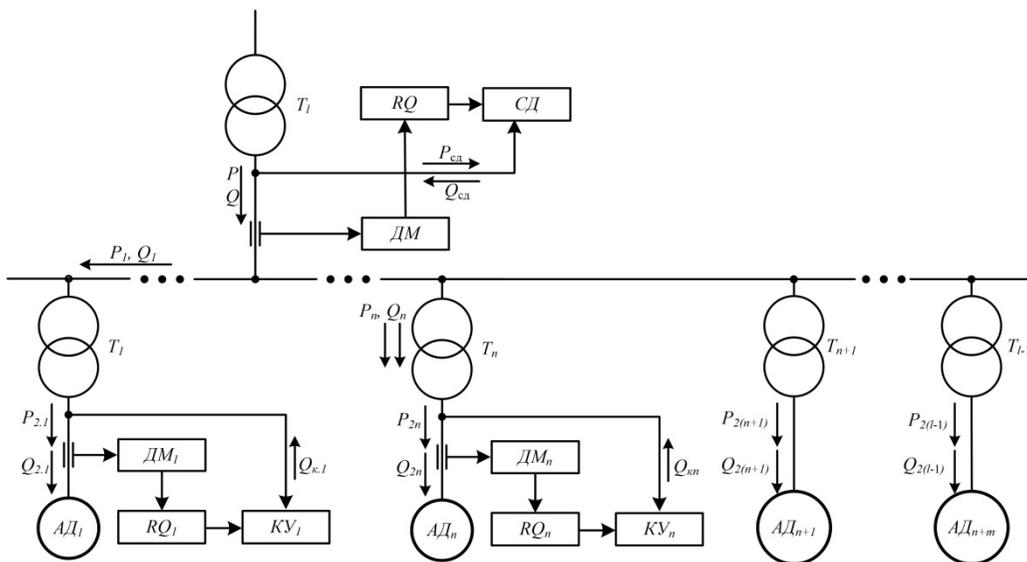


Рис. 1. Функциональная схема САУ КРМ СЭС предприятия

Обозначения на схеме: $T_1 \div T_n$ – трансформаторы цеховых подстанций; T_l – трансформатор главной понизительной подстанции; ДМ – датчики активной и реактивной мощности; АД_l ÷ АД_(n+m) – асинхронные двигатели; RQ – регуляторы реактивной мощности; KV₁ ÷ KV_n – конденсаторные установки; СД – синхронный двигатель; $l = n + m + 1$.

Обоснование САУ коэффициентом реактивной мощности СЭС предприятия

Целесообразность построения системы управления как САУ $tg\phi$ обусловлена двумя причинами.

1. При необходимости стабилизации угла между активной мощностью P и полной мощностью S на уровне $\phi = \phi_1$ с абсолютной погрешностью

$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ (относительной погрешностью $\delta_p = \Delta\varphi \cdot 100\% / \varphi_1$) с помощью САУ коэффициентом РМ – $\operatorname{tg}\varphi = Q/P$ (Q – реактивная мощность) или САУ РМ – $\cos\varphi = P/S$ их погрешности будут значительно отличаться друг от друга.

Более практичной будет первая система управления, так как она может быть выполнена более «грубой» с большей погрешностью

$$\delta_1 = \frac{\operatorname{tg}\varphi_2 - \operatorname{tg}\varphi_1}{\operatorname{tg}\varphi_1} 100\%,$$

чем вторая система управления с погрешностью

$$\delta_2 = \frac{\cos\arctg\varphi_2 - \cos\arctg\varphi_1}{\cos\arctg\varphi_1} 100\%.$$

Например, при $\varphi_1 = 21,8^\circ$ и $\varphi_2 = 22,78^\circ$ ($\Delta\varphi = 0,98^\circ$, $\delta_\varphi = 4,5\%$) значения величины $\delta_1 = 5\%$, $\delta_2 = 0,7\%$, а $\varepsilon = \delta_1/\delta_2 = 7,1$.

2. Расчет с поставщиками за потребленную электроэнергию производится в конце договорного срока (обычно месячного) с учетом величины $\operatorname{tg}\varphi$ – отношения реактивной энергии к активной.

Предельные значения $\operatorname{tg}\varphi_{\text{П}}$ в часы больших суточных нагрузок (БСН) установлены согласно приказу министра энергетики РФ от 23.06.2015 № 380 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии» в зависимости от номинального напряжения сети $U_{\text{СН}}$, к которой подключен потребитель: при $U_{\text{СН}} = 110$ кВ значение $\operatorname{tg}\varphi_{\text{П}} = 0,5$; при $U_{\text{СН}} = 1 \div 35$ кВ – $\operatorname{tg}\varphi_{\text{П}} = 0,4$; при $U_{\text{СН}} < 1$ кВ – $\operatorname{tg}\varphi_{\text{П}} = 0,35$.

Значение коэффициента РМ в часы малых суточных нагрузок (МСН) устанавливается равным нулю для всех случаев. Часы БСН – с 7⁰⁰ до 23⁰⁰, а часы МСН – с 23⁰⁰ до 7⁰⁰.

Математическая модель трансформаторной подстанции без источников РМ

Потери активной мощности в трансформаторах состоят из постоянных потерь в стали P_c и переменных потерь в их обмотках [21]:

$$P_V = a_1 \left((P_2 + P_\alpha)^2 + (Q_2 - Q_\alpha)^2 \right), \quad (1)$$

где P_2 , P_α – активные мощности электроприемников и источников РМ соответственно; Q_2 , Q_α – реактивные мощности этих элементов.

Коэффициент

$$a_1 = \frac{P_K}{S_{TH}^2}, \quad (1a)$$

где P_K – потери короткого замыкания; S_{TH} – полная номинальная мощность трансформатора.

Потери реактивной мощности в трансформаторе также состоят из постоянных потерь от намагничивания магнитопровода [21]

$$Q_{\mu} = \frac{I_{xi} \% S_{TH}}{100} \quad (2)$$

и переменных потерь [21]

$$Q_{\text{в}} = a_2 \left((P_2 + P_\alpha)^2 + (Q_2 - Q_\alpha)^2 \right), \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{1}{S_{\text{ТН}}} \sqrt{\left(\frac{U_K}{100} \right)^2 - \frac{P_K^2}{S_{\text{ТН}}^2}}, \quad (3a)$$

где U_K – напряжение короткого замыкания.

Коэффициент реактивной мощности на стороне НН трансформатора

$$\text{tg} \varphi_d = \frac{Q_2 - Q_\alpha}{P_2 + P_\alpha} \quad (4)$$

и на стороне высшего напряжения

$$\text{tg} \varphi_v = \frac{Q_r}{P_r}, \quad (5)$$

где $Q_r = Q_2 - Q_\alpha + Q_\mu + Q_V$, $P_r = P_2 + P_\alpha + P_C + P_V$.

В математической модели 1–5 без источников РМ параметры $P_\alpha = Q_\alpha = 0$.

Структурная схема подстанции как объекта управления величиной $\text{tg} \varphi_d$ или $\text{tg} \varphi_v$, построенной согласно 1–5, показана на рис. 2.

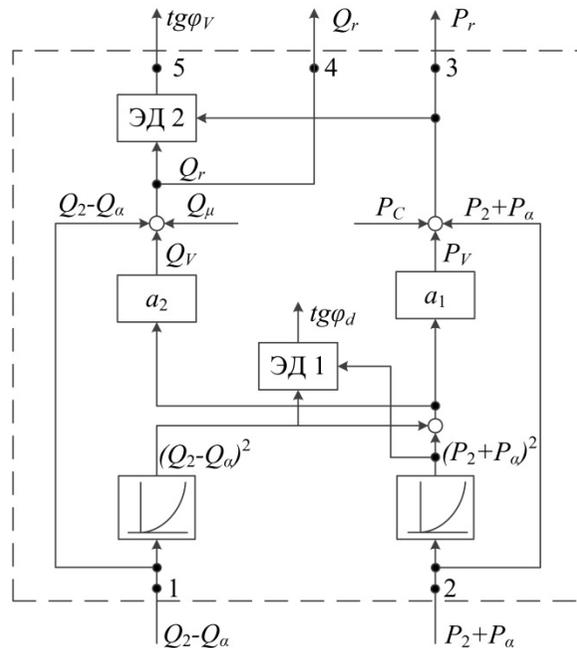


Рис. 2. Структурная схема подстанции

САУ коэффициентом РМ на стороне НН трансформатора ГПП

Алгоритм управления, сформированный в функции активной и реактивной мощности потребителей, представлен выражением

$$U_\delta = k_M Q_2 - k_M (P_2 + P_\alpha) \text{tg} \varphi_{d\varepsilon}. \quad (6)$$

Реактивная мощность источника РМ

$$Q_K = k_C U_\delta \quad (7)$$

при коэффициенте передачи САУ РМ $k_C = k_M^{-1}$ составит

$$Q_K = Q_2 - (P_2 + P_\alpha) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}, \quad (8)$$

где k_M – коэффициент передачи датчиков мощности; $\operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}$ – заданное значение коэффициента реактивной мощности на стороне НН трансформатора.

Выражения (1), (3) после подстановки в них 8 можно упростить:

$$P_V = a_1 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) (P_2 + P_\alpha)^2, \quad (9)$$

$$Q_V = a_2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) (P_2 + P_\alpha)^2. \quad (10)$$

Структурную схему САУ коэффициентом $\operatorname{tg} \varphi_d$ можно представить согласно (5)–(7), (9), (10) схемой на рис. 3.

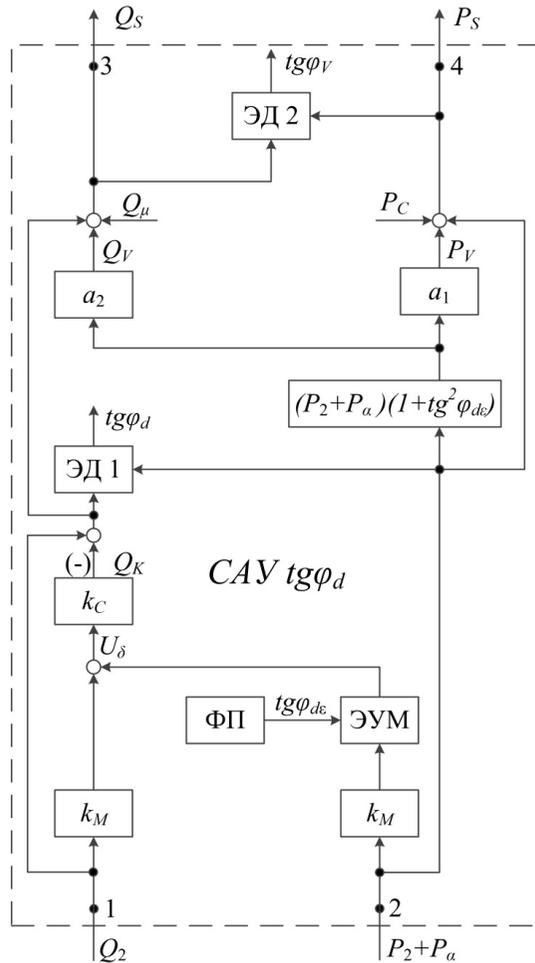


Рис. 3. Структурная схема САУ коэффициентом $\operatorname{tg} \varphi_d$

В ее состав входят: формирователь программы ФП, элемент умножения ЭУМ и деления ЭД1, датчики мощности с коэффициентом передачи k_M , САУ реактивной мощностью источника с коэффициентом передачи k_C .

Коэффициент реактивной мощности на стороне НН трансформатора согласно (8) равен заданному при всех $P_2 + P_\alpha$ и Q_2 , так как

$$\operatorname{tg} \varphi_d = \frac{Q_2 - Q_K}{P_2 + P_\alpha} = \frac{(P_2 + P_\alpha) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}}{P_2 + P_\alpha} = \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}. \quad (11)$$

При рассмотрении данной системы управления как САУ $\operatorname{tg} \varphi_V$ в ее состав следует включить ту часть, которая расположена выше блока ЭД1.

Коэффициент реактивной мощности на стороне ВН трансформатора составляет

$$\operatorname{tg} \varphi_V = \frac{Q_2 - Q_K + Q_\mu + Q_V}{P_2 + P_\alpha + P_C + P_V}. \quad (12)$$

Элементы ЭУМ, ЭД1, ЭД2 выполняют математические операции в соответствии с (6), (11), (12).

При нестабильности мощности нагрузки погрешность САУ $\operatorname{tg} \varphi_d$ согласно 11 равна нулю, а погрешность САУ $\operatorname{tg} \varphi_V$ может значительно отличаться от нуля.

Зависимость коэффициента $\operatorname{tg} \varphi_d$ от $\operatorname{tg} \varphi_V$ в САУ коэффициентом РМ на стороне НН трансформатора ГПП

Переменные потери в трансформаторах первых шести цеховых подстанций (см. рис. 1) составляют:

$$P_{Vi} = \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) P_{Ki} P_2}{S_{THi}}, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

$$Q_{Vi} = \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) U_{Ki} \% P_2^2}{100 S_{THi}}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

В остальных подстанциях без ИРМ:

$$P_{Vi} = \frac{P_{Ki} (P_2^2 + Q_2^2)}{S_{THi}^2}, \quad i = n + 1, \dots, l - 1,$$

$$Q_{Vi} = \frac{U_{Ki} \% (P_2^2 + Q_2^2)}{100 S_{THi}}, \quad i = n + 1, \dots, l - 1,$$

где $n = 6$, $l = 12$.

Реактивная мощность конденсаторных установок в первых шести подстанциях вычисляют согласно (8):

$$Q_{Ki} = Q_{2i} - P_{2i} \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon i}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

Суммарная мощность по цехам:

$$P_i = P_{2i} + P_{Ci} + P_{Vi}, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

$$Q_i = Q_{2i} - Q_{Ki} + Q_{\mu i} + Q_{Vi}, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

$$P_i = P_{2i} + P_{Ci} + P_{Vi}, \quad i = n + 1, \dots, l - 1;$$

$$Q_i = Q_{2i} + Q_{\mu C} + Q_{Vi}, \quad i = n + 1, \dots, l - 1.$$

Результаты этих расчетов занесены в табл. 1 и 2. Активную и реактивную мощность трансформатора ГПП определяют из соотношений

$$P_l = \sum_{i=1}^n P_i + \sum_{i=n+1}^{l-1} P_i + P_{CD}; \quad (14)$$

$$Q_l = \sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=n+1}^{l-1} Q_i, \quad (15)$$

где P_{CD} – активная мощность синхронных двигателей.

Из выражения

$$\operatorname{tg} \varphi_V = \frac{Q_l + Q_{\mu(n+1)} + Q_{V(n+1)} - Q_{CD}}{P_l + P_{C(n+1)} + P_{V(n+1)}}, \quad (16)$$

составленного на основании (11), получено соотношение

$$Q_{\text{ИРМ}} = Q_l + Q_{\mu(n+1)} + Q_{V(n+1)} - (P_l + P_{C(n+1)} + P_{V(n+1)}) \operatorname{tg} \varphi_{V\varepsilon}, \quad (17)$$

для определения РМ конденсаторной установки или синхронного двигателя, при которой будет обеспечено требуемое значение коэффициента $\operatorname{tg} \varphi_{V\varepsilon}$ на стороне ВН трансформатора ГПП.

Таблица 1

**Результаты расчетов мощности цехов предприятия
с трансформатором ТМ-1600**

Номер цеха	1	2	3	4	5	6	7
Тип трансформаторов	ТМ-1600						
P_{2i} , кВт $i = 1, 2, \dots, 11$	425	718	610	610	1057	1002	518
Q_{2i} , кВАр $i = 1, 2, \dots, 11$	497	955	715	715	1229	1332	518
P_{ci} , кВт $i = 1, 2, \dots, 11$	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
$Q_{\mu i}$, кВАр $i = 1, 2, \dots, 11$	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
$P_{Vi} = P_{\mu i} \frac{P_{2i}^2 + Q_{2i}^2}{S_{ТН}^2}$, кВт $i = 7, \dots, 11$	–	–	–	–	–	–	3,8
$Q_{Vi} = U_{\mu i} \frac{P_{2i}^2 + Q_{2i}^2}{S_{ТН}}$, кВАр $i = 7, \dots, 11$	–	–	–	–	–	–	18,5
$P_i = P_{2i} + P_{ci} + P_{Vi}$, кВт $i = 7, \dots, 11$	–	–	–	–	–	–	525
$Q_i = Q_{2i} + Q_{\mu i} + Q_{Vi}$, кВАр $i = 7, \dots, 11$	–	–	–	–	–	–	557
$Q_{ki} = Q_{2i} - P_{2i} \operatorname{tg} \varphi_{3i}$, кВАр $i = 1, \dots, 6$	306	632	441	441	753	881	–

Окончание табл. 1

Номер цеха	1	2	3	4	5	6	7
$P_{Vi} = (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{ei}) P_{ki} \frac{P_{2i}^2}{S_{\text{ТН}}^2}$, кВт $i = 1, \dots, 6$	1,5	4,3	3,2	9,5	9,5	8,5	–
$Q_{Vi} = U_{ki} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{ei}) \frac{P_{2i}^2}{S_{\text{ТН}}}$, кВАр $i = 1, \dots, 6$	7,5	21,3	15,4	15,4	46,2	41,5	–
$P_i = P_{2i} + P_{Vi} + P_{ci}$, кВт $i = 1, \dots, 6$	430	726	617	617	1070	1014	–
$Q_i = Q_{2i} - Q_{ki} + Q_{\mu i} + Q_{Vi}$, кВАр $i = 1, \dots, 6$	219	365	310	310	543	513	–

Таблица 2

Результаты расчетов мощности цехов предприятия с трансформатором ТМ-400 и суммарных величин мощности

Номер цеха	8	9	10	11	Σ
Тип трансформаторов	ТМ-400				
P_{2i} , кВт $i = 1, 2, \dots, 11$	162	107	135	113	–
Q_{2i} , кВАр $i = 1, 2, \dots, 11$	215	35	180	84	–
P_{ci} , кВт $i = 1, 2, \dots, 11$	1,05	1,05	1,05	1,05	–
$Q_{\mu i}$, кВАр $i = 1, 2, \dots, 11$	8,4	8,4	8,4	8,4	–
$P_{Vi} = P_{ki} \frac{P_{2i}^2 + Q_{2i}^2}{S_{\text{ТН}}^2}$, кВт $i = 7, \dots, 11$	2,5	0,4	1,7	0,7	–
$Q_{Vi} = U_{ki} \frac{P_{2i}^2 + Q_{2i}^2}{S_{\text{ТН}}}$, кВАр $i = 7, \dots, 11$	8,2	1,4	5,7	2,2	–
$P_i = P_{2i} + P_{ci} + P_{Vi}$, кВт $i = 7, \dots, 11$	155,5	108,5	137,7	114,7	$\sum_{i=7}^{11} P_i = 1051$, кВт
$Q_i = Q_{2i} + Q_{\mu i} + Q_{Vi}$, кВАр $i = 7, \dots, 11$	231,6	44,8	194,1	94,6	$\sum_{i=7}^{11} Q_i = 1120$, кВАр
$Q_{ki} = Q_{2i} - P_{2i} \operatorname{tg} \varphi_{2i}$, кВАр $i = 1, \dots, 6$	–	–	–	–	$\sum_{i=1}^6 Q_{ki} = 3454$, кВАр
$P_{Vi} = (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{ei}) P_{ki} \frac{P_{2i}^2}{S_{\text{ТН}}^2}$, кВт $i = 1, \dots, 6$	–	–	–	–	–
$Q_{Vi} = U_{ki} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{ei}) \frac{P_{2i}^2}{S_{\text{ТН}}}$, кВАр $i = 1, \dots, 6$	–	–	–	–	–
$P_i = P_{2i} + P_{Vi} + P_{ci}$, кВт $i = 1, \dots, 6$	–	–	–	–	$\sum_{i=1}^6 P_i = 5525$, кВт
$Q_i = Q_{2i} - Q_{ki} + Q_{\mu i} + Q_{Vi}$, кВАр $i = 1, \dots, 6$	–	–	–	–	$\sum_{i=1}^6 Q_i = 3372$, кВАр

При подстановке (9), (10) в (16) получено

$$\operatorname{tg} \varphi_{V\varepsilon} = \frac{P_l \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon} + a_2 P_l^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) + Q_{\mu l}}{P_l + a_1 P_{Kl} P_l^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon}) + P_{Cl}}. \quad (18)$$

Пример. Функциональная схема САУ коэффициентом РМ предприятия дана на рис. 1. Число цехов, тип трансформаторов, расчетные мощности электроприемников цехов P_{2i} , Q_{2i} , постоянные потери мощности в трансформаторах P_{Ci} , $Q_{\mu i}$ приведены в табл. 1 и 2. Подстанции первых шести цехов оснащены конденсаторными установками, а в остальных их нет. Активная мощность синхронного двигателя $P_{СД} = 1250$ кВт, активная и реактивная мощность при максимальной нагрузке цехов согласно (14), (15) составляет $P_{l1} = 5525$ кВт, $Q_{l1} = 3372$ кВАр; при минимальной нагрузке $P_{l2} = 665$ кВт; $Q_{l2} = 406$ кВАр.

Параметры трансформатора ГПП: $S_{TH12} = 16000$ кВА, $P_{C12} = 18$ кВт, $P_{K12} = 85$ кВт, $U_K \% = 10,5$, $Q_{\mu 12} = 112$ кВАр.

Определить погрешность коэффициента $\operatorname{tg} \varphi_V$ при управлении коэффициентом $\operatorname{tg} \varphi_d$.

Решение. Переменные потери в трансформаторе согласно соотношениям

$$P_{V12} = \frac{P_{K12} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{V\varepsilon}) P_l^2}{S_{T12}^2}, \quad Q_{V12} = \frac{U_K^2 \% (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{V\varepsilon}) P_l^2}{100 S_{T12}}$$

при максимальной нагрузке – $P_{V12} = 18$ кВт, $Q_{V12} = 360$ кВАр.

Реактивная мощность источников РМ (двигателя или конденсаторных установок) $Q_{\mu} = 1120$ кВАр.

При заданном коэффициенте $\operatorname{tg} \varphi_{V\varepsilon} = 0,4$ необходима стабилизация коэффициента (18) на уровне $\operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon} = 0,34$, что следует из графика на рис. 4, построенного согласно (18) при максимальной нагрузке.

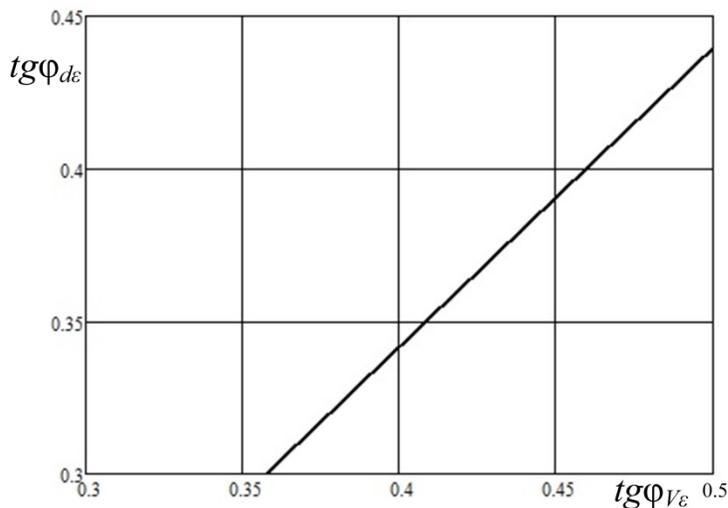


Рис. 4. График функции $\operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon} = f(\operatorname{tg} \varphi_{V\varepsilon})$

При минимальной нагрузке для стабилизации этого коэффициента на прежнем уровне требуется РМ двигателя (18) $Q_{CD} = -236$ кВАр. Переменные потери в трансформаторе составляют $Q_{V(n+1)} = 12,5$ кВАр, $P_{V(n+1)} = 0,5$ кВт, а погрешность регулирования коэффициента РМ $\delta_V = 2\%$.

В СЭС без синхронных двигателей с компенсацией РМ с помощью конденсаторных установок погрешность регулирования этого коэффициента составляет достаточно большую величину $\delta_V = 25\%$.

Она получена при $\text{tg}\varphi_{V\varepsilon} = 0,4$ и втором значении этого коэффициента, вычисленном согласно (18) при $P_{l2} = 665$ кВт; $\text{tg}\varphi_{V\varepsilon} = 0,34$, $Q_{\mu l} = 665$ кВАр, $P_{cl} = 18$ кВт, и коэффициентах 1а, 3а при $P_K = 85$ кВт, $S_{TH} = 16000$ кВА, $U_k \% = 10,5$.

Значительно меньшую погрешность можно получить в системе управления с вычислительным устройством (ВУ).

САУ коэффициентом $\text{tg}\varphi_V$ с алгоритмом управления, сформированным в функции мощности нагрузки и потерь в трансформаторе ГПП

Структурная схема такой системы управления отличается от схемы на рис. 3 наличием в ней вычислительного устройства.

Алгоритм работы ВУ, формирующего сигнал задания U_δ системы управления РМ синхронного двигателя, можно найти из (12):

$$\text{tg}\varphi_V = \frac{Q_{l1} + Q_{V(n+1)} - Q_{CD}}{P_{l1} + P_{V(n+1)}}, \quad (19)$$

где

$$P_{l1} = P_l + P_{CD} + P_{C(n+1)}, \quad Q_{l1} = Q_l + Q_{\mu(n+1)}.$$

Переменные потери в трансформаторе

$$Q_{V(n+1)} = a_{2l} \left(P_{l1}^2 + (Q_{l1} - Q_{CD})^2 \right), \quad (20)$$

$$P_{V(n+1)} = \frac{a_{1l} Q_{V(n+1)}}{a_{2l}}.$$

Как следует из (20), потери зависят от Q_{CD} , которая является неизвестной величиной.

Ввиду малости мощности $P_{V(n+1)}$ и с целью упрощения окончательного выражения она представлена приближенным соотношением

$$P_{V(n+1)} = a_{1l} \left(1 + \text{tg}^2 \varphi_{d\varepsilon} \right) P_{l1}^2. \quad (21)$$

Тогда из (19) при $\text{tg}\varphi_V = \text{tg}\varphi_{V\varepsilon}$ и $Q_{CD} = k_M^{-1} U_\delta$, т. е. из выражения

$$\text{tg}\varphi_{V\varepsilon} = \frac{Q_{l1} + a_{2l} \left((P_{l1} + P_{V(n+1)})^2 + (Q_{l1} - k_M^{-1} U_\delta)^2 \right) - k_M^{-1} U_\delta}{P_{l1} + P_{V(n+1)}},$$

получено уравнение

$$U_\delta^2 - a_3 U_\delta + a_4 = 0, \quad (22)$$

где

$$a_3 = 2Q_{l1} + \frac{100S_{THI}}{U_K \%}, \quad a_4 = Q_{l1}^2 + P_{l1}^2 + \frac{100(Q_{l1} - (P_{l1} + P_{V(n+1)}) \operatorname{tg} \varphi_{V\varepsilon}) S_{THI}}{U_K \%}.$$

Из решения уравнения (22) получено

$$U_\delta = F(x), \quad (23)$$

где

$$F(x) = k_M \left(\frac{a_3}{2} - \sqrt{\frac{a_3^2}{4} - a_4} \right), \quad x = (P_{l1}, Q_{l1}, \operatorname{tg} \varphi_{V\varepsilon}).$$

Структурная схема САУ коэффициентом РМ (рис. 5) построена согласно выражениям 19÷23. На этой схеме ЭД – элемент деления.

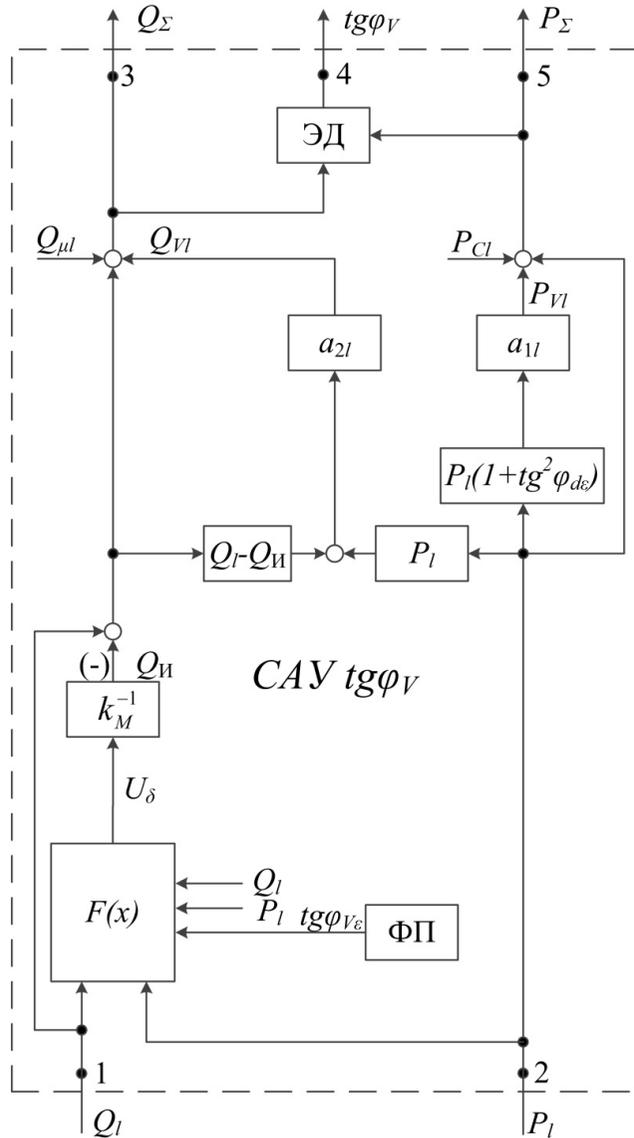


Рис. 5. Структурная схема САУ коэффициентом $\operatorname{tg} \varphi_V$

Эта система управления инвариантна к основным возмущающим воздействиям – отклонениям активной и реактивной мощности нагрузки, что подтверждается следующим примером.

При минимальной нагрузке $P_{l1} = 665$ кВт, $Q_{l1} = 406$ кВАр значения коэффициентов $a_3 = 153193$ кВА, $a_4 = 21940394$ кВА², $Q_{ki} = 143$ кВАр, $\text{tg } \varphi_{Vl} = 0,4$.

При максимальной нагрузке ($P_{l1} = 5525$ кВт, $Q_{l1} = 3372$ кВАр) значения коэффициентов $a_3 = 159125$ кВА, $a_4 = 219865533$ кВА², $Q_{ki} = k_M U_{\delta} = 1382$ кВАр, $\text{tg } \varphi_{Vl} = 0,4$.

Значение коэффициента РМ остается на заданном уровне $\text{tg } \varphi_V = 0,4$ при достаточно больших отклонениях мощности нагрузки.

САУ коэффициентом реактивной мощности $\text{tg } \varphi_V$ всего предприятия

Структурная схема данной системы управления представлена на рис. 6. Блоки БС1-БС6 являются элементами суммирования входных величин, а значения P_l и Q_l определяются выражениями (14) и (15). Схемы элементов САУ $\text{tg } \varphi_{dl}$ – САУ $\text{tg } \varphi_{dl}$ даны на рис. 3, а элементы САУ $\text{tg } \varphi_{Vl}$ – на рис. 5.

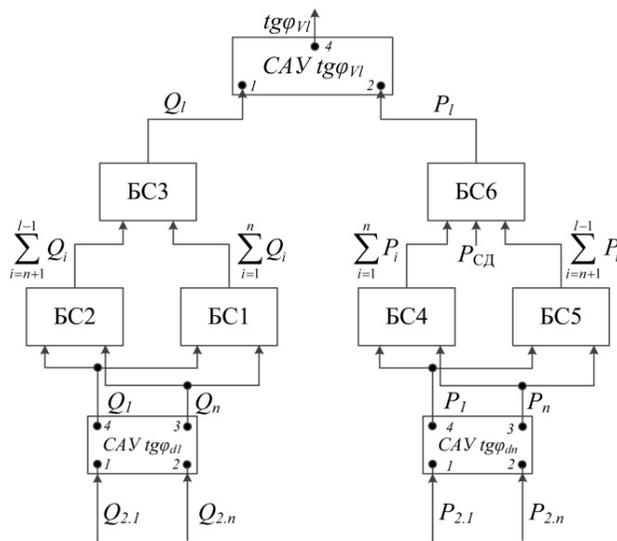


Рис. 6. Структурная схема САУ коэффициентом реактивной мощности $\text{tg } \varphi_V$ всего предприятия

Закключение

1. Достоинство САУ коэффициентом $\text{tg } \varphi$ по сравнению с САУ коэффициентом $\cos \varphi$ заключается в том, что требования к ее погрешности уменьшаются в 7,1 раза и расчет за электроэнергию производится с учетом предельных значений коэффициентов РМ.

2. САУ коэффициентом $\text{tg } \varphi_d$ предпочтительно применять в СЭС с синхронными двигателями вследствие ее простоты и обеспечения погрешности регулирования $\text{tg } \varphi_V$, где включены расчетные счетчики, равной 2 %.

3. Применение САУ коэффициентом $\text{tg } \varphi_V$ целесообразно в СЭС с конденсаторными установками, так как в случае применения САУ $\text{tg } \varphi_d$ погрешность составляет 25 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абакумов А.М., Алимов С.В., Зипман В., Мигачева Л.А., Шварц Г.Р.* Применение современного электропривода переменного тока в технологиях газовой и нефтяной промышленности. М.: Машиностроение-1, 2009.
2. *Железко Ю.С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009.
3. *Ершов С.В., Карницкий В.Ю.* Разработка адаптивного регулирования компенсации реактивной мощности // Известия Тульского государственного университета: Технические науки. 2014. № 8. С. 32–39.
4. *Кирилин И.В., Козлов П.М.* Выбор средств управления реактивной мощностью в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии // Промышленная энергетика. 2010. № 8. С. 46–52.
5. *Котенев В.И., Осипов В.С., Кочетков В.В.* Обобщенная математическая модель узла нагрузки для управления параметрами режимов в системе электроснабжения // Российская электромеханика. 2014. № 5. С. 103–106.
6. *Котенев В.И., Котенев А.В., Кочетков В.В., Елкин Д.А.* Электротехнический блок управления реактивной мощностью шины нагрузки при нестабильности напряжения // Journal of Physics: Серия конференций. 2018. Vol. 944.
7. *Котенев В.И., Осипов В.С., Кочетков В.В.* Обобщенная математическая модель узла нагрузки для управления параметрами режимов в системе электроснабжения // Российская электромеханика. 2014. № 5. С. 103–106.
8. *Котенев В.И., Елкин Д.А., Осипов В.С.* Автоматическая система регулирования реактивного коэффициента шины нагрузки // Международная конференция по промышленному машиностроению и производству (ICIEAM), 2018.
9. *Котенев В., Котенев А., Зангиев С.* Автоматическая система регулирования реактивной мощности в зависимости от параметров режима распределительной сети // XXI Международная конференция «Комплексные системы: проблемы управления и моделирования» (CSCMP). 2019.
10. *Котенев В.И., Котенев А.В., Стулов А.Д.* Управление коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения с комбинированной нагрузкой и программная коррекция в зависимости от потребляемой мощности // Международная Уральская конференция по электроэнергетике (УралКон), 2020.
11. *Пантелеев В.И., Филатов А.Н.* Управление режимами реактивной мощности и напряжения промышленного предприятия. Красноярск: Красноярский государственный технический университет, 2005.
12. *Петелин Д.П.* Автоматическое управление синхронным электрическим приводом. М.: Энергия, 1968.
13. *Fei Wang Y., Xin Yuan Y., Chen J., Jian Cheng Q.* A dynamic reactive power compensation method of super high-power and high-voltage motor // Applied Mechanics and Materials. Vol. 602–605. 2014. Pp. 2828–2831.
14. *Khabdullin A., Khabdullin A., Khabdullina Z., Khabdullina G.* Mathematical model of synchronous motors for static characteristics power loss // Energy Procedia. Vol. 95. 2016. Pp. 487–490.
15. *Cheng Q.J., Chen J., Yuan Y.X., Zhou X.S., Deng S.J.* Research on a dynamic reactive power compensation method of composite power load // Applied Mechanics and Materials. Vol. 602–605. 2014. Pp. 2840–2843.
16. *Joshi B.S., Mahela O.P., Ola S.R.* Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system // International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2016.
17. *Campaner R., Chiandone M., Sulligoi G., Milano F.* Automatic voltage and reactive power control in distribution systems: Dynamic coupling analysis // IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2016.
18. *Hongbo L., Biping G., Wangjun Z., Xinyi S., Haobin Y., Guangyu H.* Study on reactive power optimal control of distribution systems based on hybrid control theory // CIGRE Proceedings, 2010.

19. *Lakra N.S., Prakash P., Jha R.C.* Power quality improvement of distribution system by reactive power compensation // International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), 2017.
20. *Zhou X., Ma Y., Gao Z., Zhang S.* Reactive power compensation in motor // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2017.
21. *Липкин Б.Ю.* Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Высшая школа, 1990.

Статья поступила в редакцию 06 июня 2022 г.

POWER SUPPLY REACTIVE POWER FACTOR CONTROL AS A FUNCTION OF CONSUMER POWER AND LOSSES IN TRANSFORMERS

*V.I. Kotenev, A.V. Kotenev, A.D. Stulov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: ads260391@mail.ru

Abstract: *The system of automatic control of the reactive power factor of the enterprise's power supply system is considered, in which one part of the transformer substations is equipped with adjustable capacitor units, and the second is not. Its advantage in comparison with the power factor control system is shown, firstly, lower requirements for its error and, secondly, the calculation of the consumer with the supplier for electricity is made taking into account the ratio of reactive energy to active energy. An estimate of the error of regulation of the reactive power factor on the higher voltage side of the transformers of the main step-down substation, where settlement meters are installed, is given, with stabilization of the reactive power factor on the low voltage side of these transformers. The synthesis of the system of automatic control of the reactive power factor, built as a function of the power of consumers and power losses in transformers, and the estimation of its error are considered. The proposed control system is intended for power supply systems with a combined load, the use of which will allow the consumer to avoid penalty coefficients to the tariff for active electricity, and ultimately reduce losses in the transmission of electricity and increase the transmission capacity of the electrical network.*

Keywords: *control system, reactive power, power supply, error, estimation*

REFERENCES

1. *Abakumov A.M., Alimov S.V., Zipman V., Migacheva L.A., Shvarts G.R.* Primeneniye sovremennogo elektroprivoda peremennogo toka v tekhnologiyakh gazovoy i neftyanoy promyshlennosti. M.: Mashinostroyeniye-1, 2009.
2. *Zhelezko Yu.S.* Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii. M.: ENAS, 2009.
3. *Ershov S.V., Karnitsky V.Y.* Development of adaptive regulation of reactive power compensation // News of the Tula state university: Technical sciences. 2014, no. 8. Pp. 32–39.
4. *Kirilin I.V., Kozlov P.M.* Vybór sredstv upravleniya reaktivnoy moshchnost'yu v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatiy tsvetnoy metallurgii // Promyshlennaya energetika, 2010, no. 8. Pp. 46–52.
5. *Kotenev V.I., Osipov V.S., Kochetkov V.V.* Generalized mathematical model of the load node to control the modes' parameters in the power supply system // Russian Electromechanics, 2014, no.5. Pp. 103–106.
6. *Kotenev V.I., Kotenev A.V., Kochetkov V.V., Elkin D.A.* Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability // Journal of Physics: Conference series, 2018, Vol. 944.
7. *Kotenev V.I., Osipov V.S., Kochetkov V.V.* Generalized mathematical model of the load node to control the modes' parameters in the power supply system // Russian Electromechanics, 2014, no. 5. Pp. 103–106.
8. *Kotenev V.I., Elkin D.A., and Osipov V.S.* Automatic Control System of Load Bus Reactive Factor // International Conference on Industrial Engineering Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2018.

* *Viktor I. Kotenev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander V. Kotenev (Ph. D. (Techn.)), Associate Professor.
Alexander D. Stulov, Postgraduate Student.*

9. *Kotenev V., A. Kotenev, and S. Zangiev.* Automatic System for Reactive Power Control in Function of Parameters of the Distribution System Regime // XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). 2019.
10. *Kotenev V.I., Kotenev A.V., Stulov A.D.* Controlling the Reactive Power Factor of a Combined Load Power Supply System and the Correction of Program as a Function of Current Power Consumption // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2020.
11. *Panteleyev V.I., Filatov A.N.* Upravleniye rezhimami reaktivnoy moshchnosti i napryazheniya promyshlennogo predpriyatiya. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk state technical university, 2005.
12. *Petelin D.P.* Avtomaticheskoye upravleniye sinkhronnym elektricheskim privodom. M.: Energiya, 1968.
13. *Fei Wang Y., Xin Yuan Y., Chen J., Jian Cheng Q.* A dynamic reactive power compensation method of super high-power and high-voltage motor // Applied Mechanics and Materials. Vol. 602–605. 2014. Pp. 2828–2831.
14. *Khabdullin A., Khabdullin A., Khabdullina Z., Khabdullina G.* Mathematical model of synchronous motors for static characteristics power loss // Energy Procedia. Vol. 95. 2016. Pp. 487–490.
15. *Cheng Q.J., Chen J., Yuan Y.X., Zhou X.S., Deng S.J.* Research on a dynamic reactive power compensation method of composite power load // Applied Mechanics and Materials. Vol. 602–605. 2014. Pp. 2840–2843.
16. *Joshi B.S., Mahela O.P., Ola S.R.* Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system // International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2016.
17. *Campaner R., Chiandone M., Sulligoi G., Milano F.* Automatic voltage and reactive power control in distribution systems: Dynamic coupling analysis // IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2016.
18. *Hongbo L., Biping G., Wangjun Z., Xinyi S., Haobin Y., Guangyu H.* Study on reactive power optimal control of distribution systems based on hybrid control theory // CICED Proceedings, 2010.
19. *Lakra N.S., Prakash P., Jha R.C.* Power quality improvement of distribution system by reactive power compensation // International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), 2017.
20. *Zhou X., Ma Y., Gao Z., Zhang S.* Reactive power compensation in motor // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2017.
21. *Lipkin B.Yu.* Power supply of industrial enterprises and installations. M.: Higher School, 1990.