



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2023. Т. 31, № 3

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»

2023. Том 31. № 3

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

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

Отв. секретарь серии 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)

B. Nacke (проф., Германия)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2023. Том 31. № 3)

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, Самарская область,
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

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

Подписано в печать 03.12.23
Выход в свет 20.12.23

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 23,3 п.л.
Уч.-изд. л. 22,7 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 190/23
Заказ № 539

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 «Урал-Пресс» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2023
© Самарский государственный
технический университет, 2023

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

2023. Vol. 31. Issue 3

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 . Z a g r e b i n a
Compiled and typeset by O . S . A f a n a s e v a

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 the Russian Science Citation Index.

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 Ural-Press catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

<i>Галицков К.С., Самохвалов О.В., Второва Л.И.</i> Моделирование процесса удаления продуктов сгорания в коллективном дымоходе малоэтажного дома.....	6
<i>Гулина С.А., Шелудько Л.П.</i> Оптимизация тепловых схем комбинированных газотурбодетандерных энергетических установок...	22
<i>Данилушкин И.А., Колпацников С.А., Рогачев Г.Н.</i> Производственное регулирование в задаче позиционного управления рабочими воротами судоходного шлюза.....	43
<i>Орлов С.П., Косарева Е.А.</i> Система телематики и диагностики автономного грузового автомобиля	55

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

<i>Машиков А.В.</i> Разработка программного обеспечения информационно-измерительных систем для частотного анализа бинарно-квантованных сигналов.....	69
--	----

Энергетика и электротехника

<i>Лоскутов В.А., Прокопенко Я.Г., Ридель А.В., Горева Л.П.</i> Влияние условий подготовки наномасла на его электрическую прочность.....	83
<i>Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Артюхов И.И., Мамоньчев М.Е., Ерюшев П.А., Кожанов Р.В.</i> Выбор выходного инвертора для микро-грид.....	98
<i>Стариков А.В., Костюков В.Д.</i> Определение рациональной величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника	115

Информационные технологии и коммуникации

УДК 681.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В КОЛЛЕКТИВНОМ ДЫМОХОДЕ МАЛОЭТАЖНОГО ДОМА

К.С. Галицков, О.В. Самохвалов, Л.И. Второва*

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

E-mail: maes@samgtu.ru; indexcitir@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются особенности образования и способы предотвращения конденсата в дымоходе многоквартирного малоэтажного дома с индивидуальной децентрализованной системой теплоснабжения. Разработана математическая модель технологического процесса удаления дымовых газов от газовых котлов в коллективном дымоходе многоквартирного дома, рассматриваемого в качестве многомерного объекта с распределенными параметрами, под которым понимается совокупность теплофизических процессов, протекающих при удалении продуктов сгорания. Выполнено численное моделирование процессов в коллективном дымоходе на примере трехэтажного многоквартирного дома с установленными в каждой квартире газовыми котлами. Предложена методика поэтапного проведения экспериментов. На первом этапе получены зависимости распределения температурного поля внутри дымохода при нестационарной работе котлов и изменяющейся температуре окружающей среды. Подтверждено экспериментально явление возникновения конденсата, а также выявлены наиболее характерные участки, подверженные его возникновению. При проведении второго этапа исследований установлено, что предотвратить образование конденсата возможно путем установки греющего кабеля на участках чердака и оголовка дымохода. Показано, что применяемые греющие устройства оказывают влияние на температуру соседних участков дымохода. Выявленная нестационарность учтена межканальными связями через объект в структурной схеме. Доказано, что применительно к решению задачи удаления продуктов сгорания из дымохода объект с распределенными параметрами может быть представлен моделью с сосредоточенными параметрами, для которой синтезирована структура и найдены собственные операторы и операторы межканальных связей в форме передаточных функций с переменными параметрами. Полученная модель проблемно ориентирована на создание двумерной системы автоматического управления температурой на внутренней поверхности дымохода с целью предотвращения образования конденсата в трубе.

* Константин Станиславович Галицков, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства».

Олег Владимирович Самохвалов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства».

Лариса Игоревна Второва, соискатель кафедры «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства».

Ключевые слова: дымоход, дымоудаление, отопление, котел, газ, теплопередача, математическая модель, объект управления с распределенными параметрами.

Введение

При строительстве новых микрорайонов, возведении отдельно стоящих малоэтажных многоквартирных домов (МКД) и эксплуатации действующего жилого фонда в последнее время все чаще применяются индивидуальные децентрализованные системы теплоснабжения (ИДСТ). Это объясняется существенной экономией по сравнению с центральным отоплением, а также возможностью индивидуального регулирования температурного режима в отапливаемых помещениях [1–5], что доказывает перспективность применения ИДСТ МКД при решении жилищно-коммунальных проблем. Использование газового топлива представляет повышенную опасность, поэтому к газоиспользующему оборудованию предъявляются жесткие требования, одно из которых – эффективное и безопасное удаление продуктов сгорания [6, 7].

При удалении продуктов сгорания от котлов-колонок по индивидуальным или коллективным дымоходам возникают проблемы, связанные с конденсацией водяных паров из дымовых газов. Это объясняется в первую очередь высокой энергоэффективностью большинства используемых настенных котлов, цикличностью их работы и, как следствие, пониженной температурой дымовых газов, поступающих в дымоход. В результате происходит неравномерный прогрев стенок дымовой трубы по высоте и водяные пары, содержащиеся в дымовых газах, при снижении температуры превращаются в конденсат, который при соединении с продуктами сгорания образует агрессивную жидкую среду, что приводит к разрушению стенок дымохода [5].

Исследования технологических особенностей удаления дымовых газов в МКД [6, 7] показывают, что наиболее характерными участками, подверженными образованию конденсата, являются чердак и оголовок трубы дымохода, причем на последнем он возникает чаще.

Существующие инженерные решения, например представленные в [6], позволяют предотвратить возникновение конденсата путем дополнительного утепления дымоходов. Однако данное мероприятие приводит к значительным экономическим затратам и не всегда технически реализуемо ввиду ограниченных размеров существующих дымоходов и невозможности их сужения для обеспечения естественной тяги дымовых газов.

Использование в качестве дополнительного источника тепла греющего кабеля, закрепленного в верхней части трубы дымохода МКД и подключенного к системе электроснабжения, позволяет лишь исключить явление возникновения конденсата, но при этом приводит к дополнительным экономическим расходам на электроэнергию.

Поэтому предлагается обеспечить обогрев внутренней поверхности дымовой трубы отдельно на каждом из рассматриваемых участков [8] путем применения замкнутой системы автоматического управления температурой [9]. Однако отсутствие математической модели, описывающей изменение температурного поля внутри дымохода при нестационарных режимах работы котлов и изменяющейся температуре окружающей среды как объекта управления, является ограничением при синтезе системы автоматического управления, удобной для практической реализации. Решению этого вопроса посвящена данная научная работа.

Постановка задачи

В рамках рассматриваемого исследования под объектом управления (ОУ) будем понимать технологический процесс удаления продуктов сгорания от газовых котлов $K_{m1} \div K_{m3}$ в 3-этажном МКД с индивидуальным децентрализованным отоплением через трубу коллективного дымохода, вдоль оси z которой на наиболее характерных участках оголовка и чердака установлены дополнительные источники тепла, греющие кабели с соответствующими тепловыми мощностями Q_1 и Q_2 (рис. 1). Дымовые газы, образующиеся от работающих в нестационарных режимах котлов $K_{m1} \div K_{m3}$ и движущиеся со скоростями $v_{\text{дгк}1} \div v_{\text{дгк}3}$, поднимаются по оси z трёхслойного цилиндра [10, 11] (см. рис. 1), состоящего из кирпичной кладки 1, минеральной ваты 2 и стальной трубы 3, к выходному отверстию дымохода со скоростью $v^{\text{дг}}$.

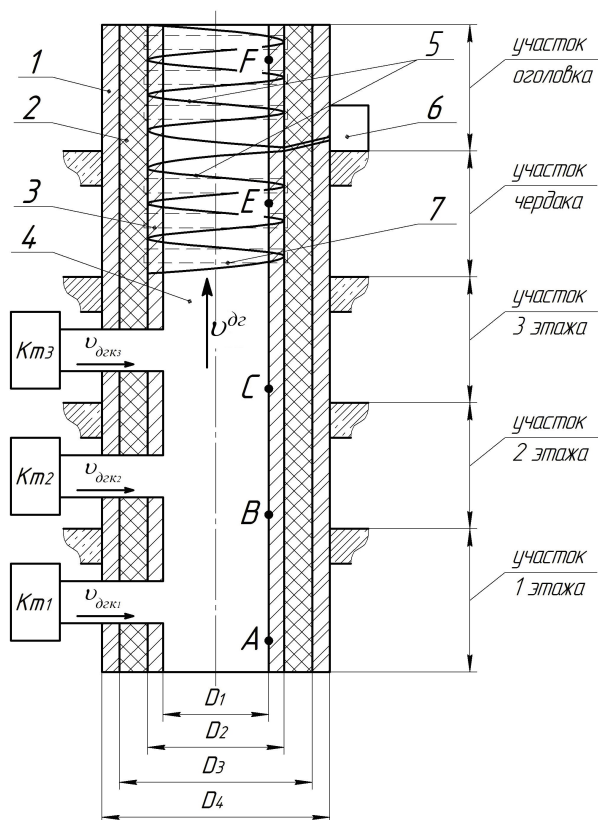


Рис. 1. Расчетная схема дымохода:

1 – кирпичная кладка; 2 – теплоизоляция (минеральная вата); 3 – стальная труба, через которую проходят дымовые газы; 4; 5 – греющие кабели на участках оголовка и чердака соответственно; 6 – шкаф управления; 7 – бандаж; K_{m1} , K_{m2} , K_{m3} – котлы на 1-м, 2-м и 3-м этажах соответственно; $v_{\text{дгк}1}$, $v_{\text{дгк}2}$, $v_{\text{дгк}3}$ – скорости дымовых газов на входах в дымоход, формируемые котлами 1, 2 и 3 соответственно; $v^{\text{дг}}$ – скорость дымовых газов в дымоходе; D_1 , D_2 , D_3 , D_4 – диаметры границ раздела сред и материалов слоев дымохода; A, B, C, E, F – принятые расчетные точки исследования

Поэтому задачей настоящего исследования является разработка математической модели технологического процесса удаления продуктов сгорания через трубу коллективного дымохода в форме операторов, связывающих температуру

в двух сечениях (F , E) дымохода с двумя управляющими воздействиями – мощностями Q_1 и Q_2 греющих кабелей.

В качестве возмущающих воздействий, действующих на объект, приняты температура T_c наружного воздуха (окружающей среды) и тепловые мощности Q_{k1} , Q_{k2} , Q_{k3} котлов, формируемые режимом «тактования» их работы.

Решение задачи

Поставленная задача технологического процесса удаления продуктов сгорания через трубу дымохода, где состояние ОУ будет определяться температурой внутренней поверхности трубы на характерных участках оголовка и чердака, целесообразно решить последовательно в два этапа. На первом – разработать математическое описание и выполнить исследования изменения температурного поля внутри дымохода при вариации тепловых мощностей и режимов работы котлоколонок. На втором предлагается провести эксперименты, где регулирование и поддержание требуемой температуры в наиболее характерных сечениях F и E (см. рис. 1) будет обеспечиваться путем дополнительно установленных нагревательных элементов с соответствующими мощностями Q_1 и Q_2 . Для реализации первого этапа процесс удаления продуктов сгорания в трубе дымохода как многомерный объект управления может быть представлен в виде структуры (рис. 2). Здесь выходные координаты обозначены вектором $\bar{X} = [T_F, T_E]^T$, управляющее воздействие – вектором $\bar{U} = [Q_{k1}, Q_{k2}, Q_{k3}]^T$, а возмущение – T_c .

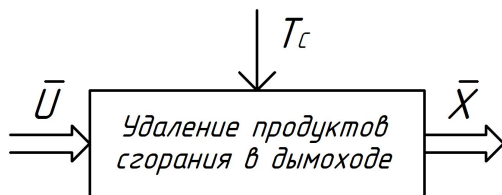


Рис. 2. Обобщенная структура объекта управления

При разработке математической модели введен ряд допущений:

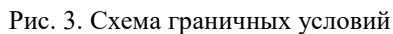
- на этажах установлены котлы одной марки и мощности;
- теплопотери через ограждающие конструкции стационарны;
- в квартирах используются одинаковые конвективно-радиационные отопительные приборы;
- величина тепловой инерционности отопительного контура квартир идентична;
- здание имеет единую ограждающую конструкцию и оконное остекление для инфильтрации;
- при работе котлов на разных мощностях температура дымовых газов постоянна;
- тепловыми потерями на коротких теплоизолированных участках трубы от дымоотвода каждого из котлов до коллективного дымохода можно пренебречь.

Математическое описание трубы коллективного дымохода многоквартирного дома может быть представлено в виде уравнений термодинамики газовой среды (дымовых газов) и теплопередачи в твердом теле (слоями дымохода) [12–17]:

$$\left. \begin{aligned}
& \frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial \tau} + v_r^{\partial z} \frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial r} + v_z^{\partial z} \frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial z} + \frac{1}{\rho^{\partial z}} \cdot \frac{\partial p^{\partial z}}{\partial r} = -b v_z^{\partial z} + \\
& + \frac{\mu^{\partial z}}{\rho^{\partial z}} \left(\frac{\partial^2 v_r^{\partial z}}{\partial r^2} + \frac{3}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_z^{\partial z}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial r} - \frac{v_r^{\partial z}}{r^2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_z^{\partial z}}{\partial r \partial z} \right), \\
& \frac{\partial v_z^{\partial z}}{\partial \tau} + v_r^{\partial z} \frac{\partial v_z^{\partial z}}{\partial r} + v_z^{\partial z} \frac{\partial v_z^{\partial z}}{\partial z} + \frac{1}{\rho^{\partial z}} \cdot \frac{\partial p^{\partial z}}{\partial z} = b v_r^{\partial z} - g + \\
& + \frac{\mu^{\partial z}}{\rho^{\partial z}} \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_z^{\partial z}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z^{\partial z}}{\partial z^2} + \frac{3}{4r} \cdot \frac{\partial v_z^{\partial z}}{\partial r} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_r^{\partial z}}{\partial r \partial z} + \frac{1}{4r} \cdot \frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial z} \right), \\
& \frac{\partial \rho^{\partial z}}{\partial \tau} + v_r^{\partial z} \frac{\partial \rho^{\partial z}}{\partial r} + v_z^{\partial z} \frac{\partial \rho^{\partial z}}{\partial z} + \rho^{\partial z} \left(\frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial r} + \frac{v_r^{\partial z}}{r} + \frac{\partial v_z^{\partial z}}{\partial z} \right) = 0, \\
& \frac{\partial T^{\partial z}}{\partial \tau} + v_r^{\partial z} \frac{\partial T^{\partial z}}{\partial r} + v_z^{\partial z} \frac{\partial T^{\partial z}}{\partial z} + T^{\partial z} \left(\frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial r} + \frac{v_r^{\partial z}}{r} + \frac{\partial v_z^{\partial z}}{\partial z} \right) = \\
& \frac{\lambda^{\partial z}}{c_p^{\partial z} \rho^{\partial z}} \left(\frac{\partial^2 T^{\partial z}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T^{\partial z}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T^{\partial z}}{\partial r} \right) + \frac{\lambda^{\partial z}}{c_p^{\partial z} 2 \rho^{\partial z}} \left[\left(\frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial r} - \frac{v_r^{\partial z}}{r} \right)^2 + \right. \\
& \left. + \left(\frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial r} - \frac{\partial v_z^{\partial z}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{v_r^{\partial z}}{r} - \frac{\partial v_z^{\partial z}}{\partial z} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial v_r^{\partial z}}{\partial z} + \frac{\partial v_z^{\partial z}}{\partial r} \right)^2 \right], \\
& p^{\partial z} - \rho^{\partial z} R T^{\partial z} = 0, \\
& \mu^{\partial z} = f(T^{\partial z}), \\
& \frac{\partial T_{cm}(z, r, \tau)}{\partial \tau} = a_{cm} \left(\frac{\partial^2 T_{cm}(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{cm}(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{cm}(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right), \\
& \frac{\partial T_{mv}(z, r, \tau)}{\partial \tau} = a_{mv} \left(\frac{\partial^2 T_{mv}(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{mv}(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{mv}(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right), \\
& \frac{\partial T_{\kappa}(z, r, \tau)}{\partial \tau} = a_{\kappa} \left(\frac{\partial^2 T_{\kappa}(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\kappa}(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{\kappa}(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right),
\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $v^{\partial z}$, $p^{\partial z}$, $\rho^{\partial z}$, $T^{\partial z}$, $\lambda^{\partial z}$, $c_p^{\partial z}$, $\mu^{\partial z}$ – скорость, давление, плотность, температура, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость (при постоянном давлении) и коэффициент вязкости дымовых газов соответственно; b и g – составляющие векторов ускорения силы тяжести и Кориолиса соответственно; R – газовая постоянная; τ , z , r – время, длина и радиус в цилиндрических координатах; a_{cm} , a_{mv} , a_{κ} , T_{cm} , T_{mv} , T_{κ} – коэффициенты температуропроводности и температуры стальной трубы, минеральной ваты и кирпичной кладки соответственно.

Для решения системы уравнений (1) составлены краевые условия с использованием разработанной схемы (рис. 3).


$$\left. \begin{aligned} v_z^{\partial z}(z, 0) &= 0, \\ v_r^{\partial z}(r, 0) &= 0, r \in [0; R_1], \\ T^{\partial z}(z, r, 0) &= T_c, r \in [0; R_1], \\ \rho^{\partial z}(z, r, 0) &= \rho_0^{\partial z}, r \in [0; R_1], \\ T_{cm}(z, r, 0) &= T_c, r \in [R_1; R_2], \\ T_{me}(z, r, 0) &= T_c, r \in [R_2; R_3], \\ T_{\kappa}(z, r, 0) &= T_c, r \in [R_3; R_4], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В результате граничные условия:

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
(\Gamma 1) \left\{ \begin{aligned}
\lambda_{cm} \frac{\partial T_{cm}(L, r, \tau)}{\partial z} &= \alpha_1 (T_c(\tau) - T_{cm}(L, r, \tau)), r \in [R_1; R_2], \\
\lambda_{m6} \frac{\partial T_{m6}(L, r, \tau)}{\partial z} &= \alpha_1 (T_c(\tau) - T_{m6}(L, r, \tau)), r \in [R_2; R_3], \\
\lambda_{\kappa} \frac{\partial T_{\kappa}(L, r, \tau)}{\partial z} &= \alpha_1 (T_c(\tau) - T_{\kappa}(L, r, \tau)), r \in [R_3; R_4],
\end{aligned} \right. \\
(\Gamma 2) \lambda_{\kappa} \frac{\partial T_{\kappa}(z, R_4, \tau)}{\partial r} &= \alpha_2 (T_c(z, R_4 + \Delta R, \tau) - T_{\kappa}(z, R_4, \tau)), z \in [0; L], \\
(\Gamma 3) \lambda_{cm} \frac{\partial T_{cm}(z, R_1, \tau)}{\partial z} &= \alpha_3 (T_{\partial c}(z, R_1 - \Delta R, \tau) - T_{cm}(z, R_1, \tau)) + \\
&+ \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{\partial c} \cdot \varepsilon_{cm} (T_{\partial c}^4(z, R_1 - \Delta R, \tau) - T_{cm}^4(z, R_1, \tau))}{T_{\partial c}(z, R_1 - \Delta R, \tau) - T_{cm}(z, R_1, \tau)}, z \in [0; L], \\
(\Gamma 4) \lambda_{m6} \frac{\partial T_{m6}(z, R_2, \tau)}{\partial r} &= \lambda_{cm} \frac{\partial T_{cm}(z, R_2, \tau)}{\partial r}, z \in [0; L], \\
(\Gamma 5) \lambda_{\kappa} \frac{\partial T_{\kappa}(z, R_3, \tau)}{\partial r} &= \lambda_{m6} \frac{\partial T_{m6}(z, R_3, \tau)}{\partial r}, z \in [0; L], \\
(\Gamma 6) \left\{ \begin{aligned}
v_z^{\partial c}(z, r) \Big|_{z=L} &= \frac{Q_{ecm.m9zu}}{\pi R_1^2}, r \in [0; R_1], \\
p^{\partial c}(z, r) \Big|_{z=L} &= p_a, r \in [0; R_1], \\
\frac{\partial v_r^{\partial c}(z, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{z=L} &= 0, r \in (0; R_1), \\
\frac{\partial T^{\partial c}(z, r, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=L} &= \frac{\partial T^{\partial c}(z, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{z=L} = 0, r \in (0; R_1),
\end{aligned} \right. \\
(\Gamma 7) \left\{ \begin{aligned}
v_{z1}^{\partial c}(z, r) \Big|_{z=L_1} &= \frac{Q_{\kappa 1}}{\pi R}, r = R_4, \\
v_{z2}^{\partial c}(z, r) \Big|_{z=L_2} &= \frac{Q_{\kappa 2}}{\pi R}, r = R_4, \\
v_{z3}^{\partial c}(z, r) \Big|_{z=L_3} &= \frac{Q_{\kappa 3}}{\pi R}, r = R_4,
\end{aligned} \right. \\
(\Gamma 8) \left\{ \begin{aligned}
v_z^{\partial c}(z, r, \tau) \Big|_{r=R_1} &= 0, z \in [0; L], \\
v_r^{\partial c}(z, r, \tau) \Big|_{r=R_1} &= 0, z \in [0; L], \\
\frac{\partial p^{\partial c}(z, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_1} &= 0, z \in [0; L],
\end{aligned} \right. \\
(\Gamma 9) \left\{ \begin{aligned}
v_r^{\partial c}(z, r, \tau) \Big|_{r=0} &= 0, z \in [0; L], \\
\frac{\partial v_z^{\partial c}(z, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0, z \in [0; L].
\end{aligned} \right.
\end{aligned} \tag{3}$$

В системе (3) выделим отдельные условия, а именно: Г1 соответствует теплопередаче между окружающей средой и поверхностью торцов дымохода кирпичной кладки $[R_4; R_3]$, кольца минеральной ваты $[R_3; R_2]$ и стального кольца $[R_2; R_1]$. Граница Г2 образуется внешней поверхностью кирпичной кладки с окружающей средой через коэффициент λ_{κ} по всей длине дымохода $z \in [0; L]$; Г3 – граница взаимодействия стали с дымовыми газами через коэффициент λ_{cm}

$z \in [0; L]$. Границы Г4, Г5 образуются между поверхностями сталь – минеральная вата и минеральная вата – кирпичная кладка соответственно. Границы Г6 и Г7 описывают величины давления $p^{\partial z}$, температуры $T^{\partial z}$ и скорости $v^{\partial z}$ (через расход) дымовых газов на выходе и входах дымохода соответственно; L_1, L_2, L_3 – расстояние до 1-го, 2-го и 3-го котлов соответственно. Составляющая скорости $v_r^{\partial z}$ на границе Г8 показывает непроницаемость поверхности стали для газа, а $v_z^{\partial z}$ и производная давления $\frac{\partial p^{\partial z}}{\partial r}$ – что в вязком газе имеет место прилипание его частиц к поверхности стали. Условия на границе Г9 отображают, что на оси дымохода в силу симметрии только составляющая скорости $v_z^{\partial z}$ отлична от нуля. В системе (3) σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\varepsilon_{\partial z}$ – степень черноты дымовых газов; $R_1, R_2, R_3, R_4, \Delta R$ – радиусы границ раздела сред и материалов слоев дымохода и толщина пограничного слоя между ними соответственно; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты теплоотдачи от твердой поверхности к газовой среде; $\lambda_{ст}, \lambda_{мв}, \lambda_{к}$ – коэффициенты теплопроводности; $\rho_{ст}, \rho_{мв}, \rho_{к}$ – плотности стали, минеральной ваты и кирпичной кладки соответственно; $Q_{ест.тяги}, Q_{к1}, Q_{к2}, Q_{к3}$ – расходы дымовых газов при силе естественной тяги и работе котлов $K_{м1} \div K_{м3}$ соответственно; p_a – атмосферное давление.

Исследование объекта управления проводилось в программной среде SolidWorks, в которой на основе математического описания (1) и краевых условий (2), (3) применительно к дымоходу трехэтажного здания была создана вычислительная модель с использованием методик [18, 19], теплофизические и геометрические параметры которой соответствуют реальному дымоходу.

Программа исследования включала в себя следующие этапы.

1. Формирование условий создания вычислительной модели дымохода в программной среде SolidWorks: а) теплообмен: теплопередача в твердых телах, излучательный теплообмен; б) состав дымовых газов: CO_2 – углекислый газ, N_2 – азот, O_2 – кислород, Ar – аргон, H_2O – водяной пар; в) тип течения газа – турбулентный; г) материал слоев дымохода: стенка – кирпич керамический, утеплитель – минеральная вата, труба – сталь AISI 430; д) начальные условия газовой среды: температура наружного воздуха в отопительный период = -30°C ; температура на чердаке = -5°C ; температура внутри помещения = 18°C ; атмосферное давление на выходе в самой высокой точке трубы (10 м) = 759,1 мм.рт.ст = 101217,18 Па; температура уходящих дымовых газов от котла = 105°C ; температура точки росы для рассматриваемого газа Пролетарского месторождения 51°C ; е) начальные и граничные условия в дымоходе; к) параметры расчетной сетки.

2. Исследование динамики прогрева дымохода. Задавалось расчетное время вывода дымохода в установившийся температурный режим. Выполнены расчеты и получены данные распределения температуры на внутренней поверхности трубы дымохода по времени при длительной работе наиболее удаленного от оголовка дымохода котла $K_{м1}$ для пяти характерных участков.

3. Исследования функций отклика температуры в сечениях E и F дымохода при длительной работе котлов $K_{м1} \div K_{м3}$, а также их совместной работе (с учетом технических особенностей эксплуатации).

Доказана адекватность разработанной имитационной модели путем сравнительного анализа полученных численных установившихся значений температуры в центре сечений выбранных пространственных участков A, B, C, E, F дымовой трубы с результатами, рассчитанными по методике, рекомендованной проектным

конструкторским и научно-исследовательским институтом «СантехНИИпроект». Исследование выполнено на примере работы наиболее удаленного от оголовка трубы котла K_{m1} для трех значений наружной температуры воздуха, °C: -10 ; -20 ; -30 .

Сравнение кривых (рис. 4) показало, что мера разброса данных на рассматриваемых участках E и F не превышает 3 °C ($\approx 4\%$).

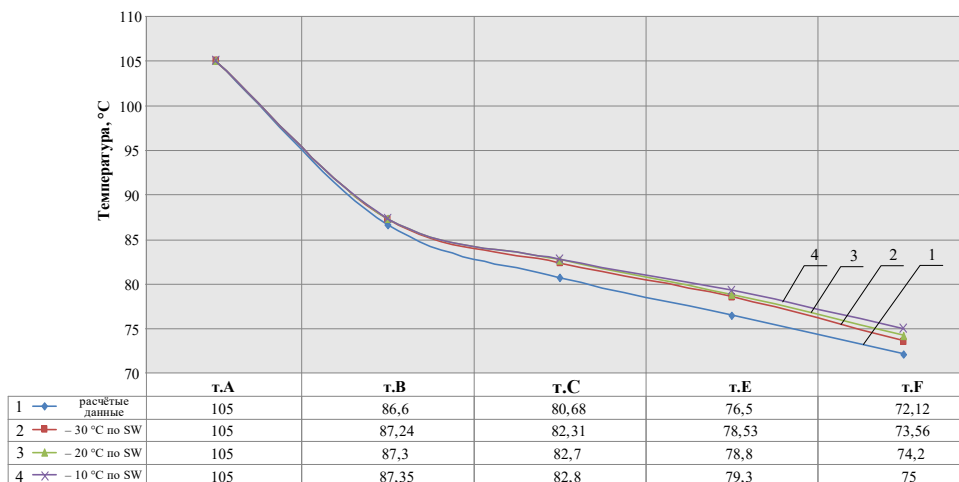


Рис. 4. Сравнительный анализ распределения температуры по длине дымохода (в центре сечения) при работе котла K_{m1} : 1 – расчет по методике института «СантехНИИпроект»; 2 – SolidWorks ($T_c = -30\text{ °C}$); 3 – SolidWorks ($T_c = -20\text{ °C}$); 4 – SolidWorks ($T_c = -10\text{ °C}$)

Проведенное численное моделирование трубы коллективного дымохода при нестационарной работе газовых котлов в условиях изменения температуры наружного воздуха (окружающей среды) для принятого случая от -30 до $+8\text{ °C}$ показало, что рассматриваемые характерные участки чердака и оголовка подвержены возникновению конденсата при работе котлов в режиме «тактования» (см. таблицу). Поэтому дальнейшее исследование осуществлялось относительно принятых точек E и F (см. рис. 1).

Для достижения поставленной цели исследования на следующем этапе выполнено моделирование изменения температурного поля на чердаке и оголовке дымохода с учетом формируемых температурных режимов (рис. 5) при индивидуальной работе котлов $K_{m1} \div K_{m3}$. Здесь на 1-м этапе газовые котлы отключены и происходит охлаждение дымохода от принятой температуры в помещении T_{Π} до установившегося значения T_0 в соответствующих точках (оголовки или чердак). На следующем, 2-м этапе осуществляется включение соответствующего котла $K_{m1} \div K_{m3}$ до достижения установившегося значения температуры T_{κ} , после чего (3-й этап) работающий котел отключается и происходит естественное остывание стенок трубы дымохода до температуры T_0 .

Исследования проводились для индивидуально работающих котлов $K_{m1} \div K_{m3}$ при изменении температуры окружающей среды от -30 до $+8\text{ °C}$. Выполнена аппроксимация полученных на имитационной модели данных, в результате которой динамика температурного поля может быть представлена передаточными функциями первого порядка с нестационарными параметрами (см. таблицу).

Наиболее характерный результат аппроксимации температурного поля в точках *E* и *F* для 2-го режима (нагрев) при температуре $T_c = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлен на рис. 6.

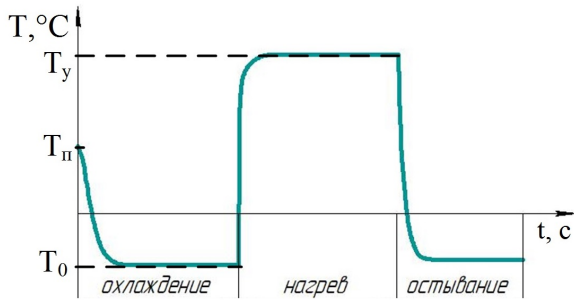


Рис. 5. Формируемые температурные режимы для исследования температурного поля на характерных участках дымохода

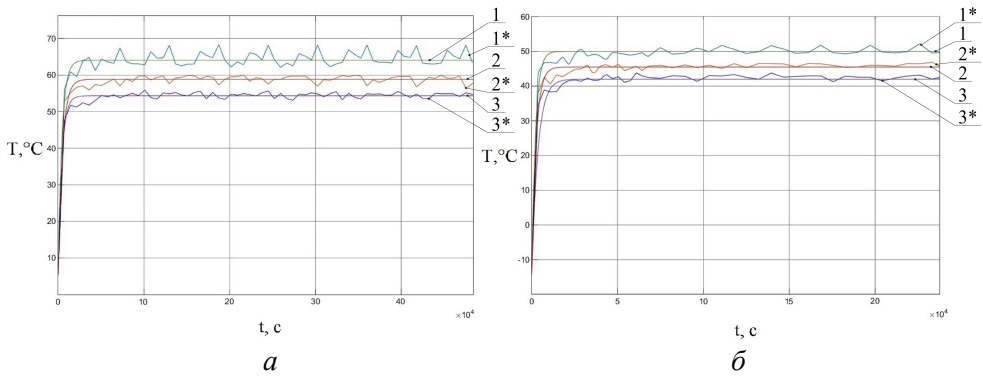


Рис. 6. Аппроксимация влияния длительной работы котлов на изменение температурного поля в точках *E* (а) и *F* (б). Здесь 1 и 1*, 2 и 2*, 3 и 3* – данные с модели SolidWorks и результаты аппроксимации при индивидуальной работе котлов K_{m1} , K_{m2} , K_{m3} соответственно

Результаты аппроксимации температурного поля на оголовке и чердаке при индивидуальной работе котлов (температура $T_c = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Процесс	Охлаждение				Нагрев				Остывание			
Передаточная функция	$W_{i\text{охл}}(p) = \frac{k_{i\text{охл}}}{T_{i\text{охл}}p + 1}$				$W_{i\text{н}}(p) = \frac{k_{i\text{н}}}{T_{i\text{н}}p + 1}$				$W_{i\text{ост}}(p) = \frac{k_{i\text{ост}}}{T_{i\text{ост}}p + 1}$			
	$k_{i\text{охл}}$		$T_{i\text{охл}}$		$k_{i\text{н}}$		$T_{i\text{н}}$		$k_{i\text{ост}}$		$T_{i\text{ост}}$	
Точки	т. F	т. E	т. F	т. E	т. F	т. E	т. F	т. E	т. F	т. E	т. F	т. E
Котел № 1	32,16	12,7	29000	43200	55,16	47,5	2500	3900	53,16	49,16	10800	10800
Котел № 2	32,16	12,7	29000	43200	57,66	51,4	2500	3600	53,16	53,56	8800	8800
Котел № 3	32,16	12,7	29000	43200	63,16	58,7	2200	2700	62,06	57,66	1200	1200

На втором этапе исследований разработанная математическая модель технологического процесса удаления дымовых газов от колонок в МКД через трубу коллективного дымохода дополнена источниками тепла, греющими кабелями, установленными на участках чердака и оголовка дымохода, тепловая мощность которых рассчитана в соответствии с действующими методиками и рекомендациями.

При проведении исследований использовался режим, подобный представленному на рис. 5. Здесь на первом этапе происходит охлаждение стенок трубы дымохода при неработающих котлах, затем подается напряжение на соответствующий греющий кабель, установленный на участках чердака и оголовка трубы. Результаты экспериментов при $T_c = -30^\circ\text{C}$ представлены на рис. 7.

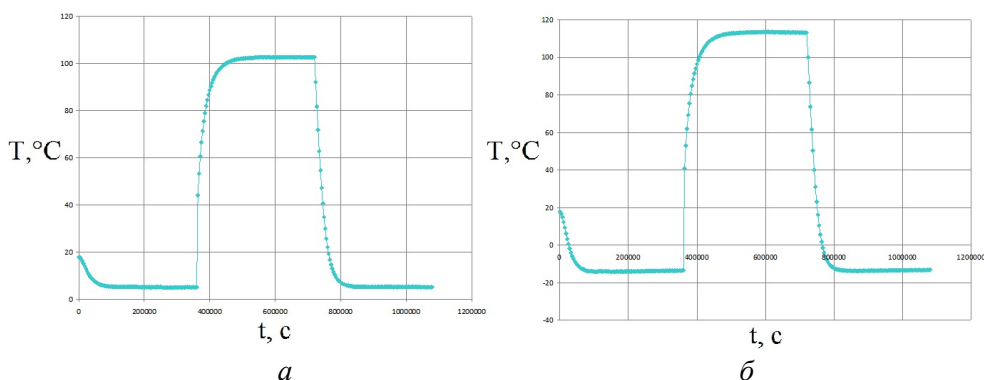


Рис. 7. Процессы изменения температуры на участках чердака (а) и оголовка (б) при работе соответствующих греющих кабелей

Выполнена серия экспериментов в программной среде SolidWorks по исследованию влияния нагревательных элементов, установленных на характерных участках оголовка (сечение F) и чердака (сечение E), на динамику изменения температурного поля, в том числе на эффект возникновения конденсата.

Установлено, что изменение управляющих воздействий Q_1 и Q_2 оказывает влияние не только на изменение температурного поля на чердаке и оголовке, но и на температуру соседних участков дымохода (рис. 8). Выявленная нестационарность может быть учтена в структурной схеме межканальными связями через объект.

Выполнен анализ полученных данных и проведена аппроксимация в программной среде MATLAB переходных процессов греющих кабелей, установленных на характерных участках, а также выявлено их влияние на соседние участки (при изменении T_c в диапазоне от -30 до $+8^\circ\text{C}$), которые в первом приближении могут быть описаны динамическими звеньями первого порядка.

В результате проведенных исследований математическая модель удаления продуктов сгорания в трубе дымохода может быть представлена в виде матричной структуры многомерного объекта (рис. 9) [20]. Здесь $\bar{Y}$, $\bar{H}$, $\bar{X}$ – векторы управляющих, возмущающих и выходных координат, где $\bar{Y} = [Q_1, Q_2]^T$, $\bar{H} = [Q_{k1}, Q_{k2}, Q_{k3}, T_c]^T$, $\bar{X} = [T_F, T_E]^T$; А и В – операторы объекта управления по отношению к векторам $\bar{Y}$ и $\bar{H}$.

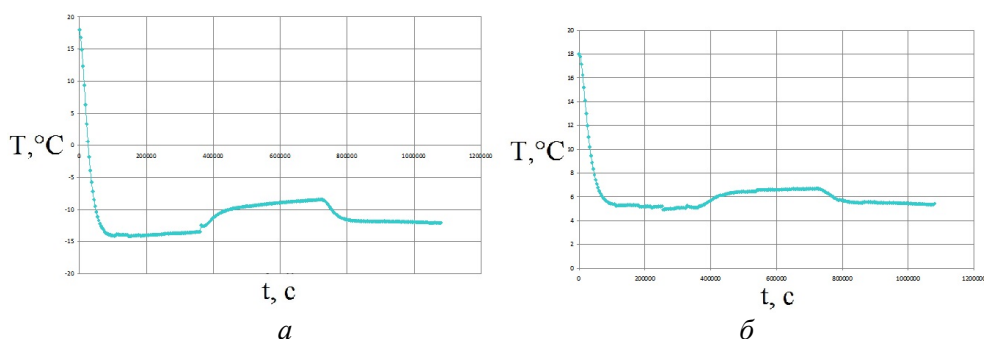


Рис. 8. Влияние греющего кабеля на изменение температуры на соседних участках (межканальные связи): а – обогрев чердака на участок оголовка; б – обогрев оголовка на участок чердака

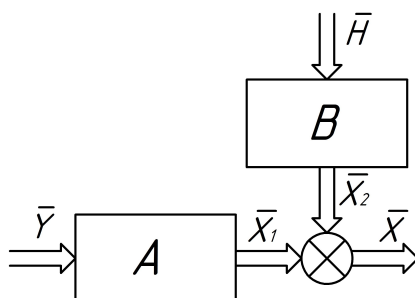


Рис. 9. Матричная структура многомерного ОУ

На основании матричной структуры (см. рис. 9) синтезирована многомерная структура объекта управления (рис. 10), описываемая матричным уравнением:

$$\bar{X} = A \cdot \bar{Y} + B \cdot \bar{H}, \quad (4)$$

где $A = \begin{bmatrix} W_{11}(p) & M_{12}(p) \\ M_{21}(p) & W_{22}(p) \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} H_{1F}(p) & H_{2F}(p) & H_{3F}(p) & H_{cF}(p) \\ H_{1E}(p) & H_{2E}(p) & H_{3E}(p) & H_{cE}(p) \end{bmatrix}$.

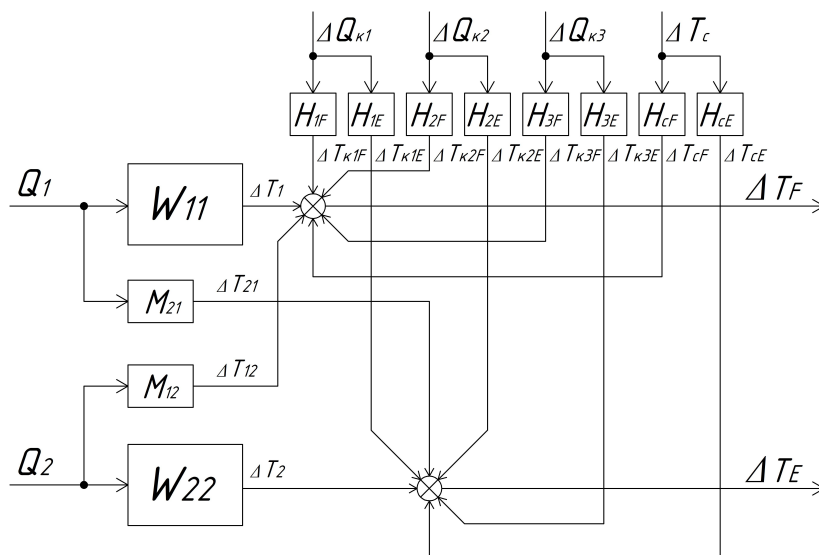


Рис. 10. Линеаризованная структурная схема многомерного объекта управления

Анализ проведенных исследований в программной среде SolidWorks показал, что операторы H_{1F} , H_{1E} , H_{2F} , H_{2E} , H_{3F} , H_{3E} , характеризующие работу котлов K_{m1} , K_{m2} , K_{m3} ; W_{11} , W_{12} с учетом межканальных связей M_{21} , M_{12} , описывающих динамику греющих кабелей, могут быть с достаточной степенью точности (среднеквадратичная погрешность не превышает 7 %) описаны динамическими звеньями первого порядка (5) с переменными параметрами

$$\left. \begin{aligned} W_{11}(p), M_{21}(p) &= \frac{K_{j1}}{T_{j1}p + 1}, \\ M_{12}(p), W_{22}(p) &= \frac{K_{j2}}{T_{j2}p + 1}, j \in 1, 2 \\ H_{1F}(p), H_{2F}(p), H_{3F}(p), H_{cF}(p) &= \frac{K_{i3}}{T_{i3}p + 1}, \\ H_{1E}(p), H_{2E}(p), H_{3E}(p), H_{cE}(p) &= \frac{K_{i4}}{T_{i4}p + 1}, i \in 1, 2, 3, 4. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В результате считаем, что разработанная модель удаления продуктов сгорания из трубы дымохода адекватно описывает процессы изменения температурного поля внутренней поверхности дымохода.

Выводы

1. Разработано математическое описание технологического процесса удаления продуктов сгорания из трубы дымохода как объекта управления с распределенными параметрами, на его основе создана вычислительная модель в программной среде SolidWorks. Показано, что модель адекватно описывает изменение температурного режима дымохода по отношению к управляющим воздействиям – мощностям Q_1 и Q_2 нагревательных элементов и возмущениям – температуре окружающей среды T_c и вариациям расхода ΔQ_{k1-3} газовых котлов.

2. Синтезирована структура многомерной модели удаления продуктов сгорания из трубы дымохода с сосредоточенными параметрами, где выходными координатами является температура T_F и T_E на двух участках прогрева дымохода, ориентированная на синтез системы автоматического управления предотвращением образования конденсата в дымоходе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ватузов Д.Н., Пуринг С.М., Филатова Е.Б., Тюрин Н.П. Выбор источника теплоснабжения зданий жилой застройки // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2014. № 4 (17). С. 86–91.
2. Алешин А.Н., Зеленцов Д.В., Новопашина Н.А. Разработка технической политики по капитальному ремонту систем отопления и газоснабжения многоквартирных домов в Самарской области // Научное обозрение. 2014. № 9–3. С. 773–777.
3. Новопашина Н.А. Поквартирное отопление – основа реализации дополнительной застройки территорий и экономии бюджетных инвестиций // Социально-экономические проблемы в развитии строительного комплекса: Межвузовский юбилейный сборник научных трудов. 2005. С. 77–80.
4. Ватузов Д.Н., Пуринг С.М., Филатова Е.Б. Способы повышения рационального потребления и распределения тепловой энергии в жилых зданиях // Научный потенциал регионов на службу модернизации. Межвузовский сборник. 2013. № 3 (6). С. 33–35.

5. *Новопашина Н.А., Баландина О.А.* Применение конденсационных котлов-колонок для автономного теплоснабжения // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: Материалы 69-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2011 года. С. 102–105.
6. *Орешин Г.Ю.* Современная технология защиты, ремонта, восстановления дымоходных и вентиляционных каналов от коррозии, конденсата, разрушения с использованием полимерного термопластического вкладыша Фуранфлекс // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). С. 143.
7. *Соснин Ю.П., Бухаркин Е.Н.* Бытовые печи, камин и водонагреватели. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1990. 384 с.
8. *Самохвалов О.В., Второва Л.И.* Проектирование крепления устройства обогрева в дымоходе малоэтажного здания // Механизация и автоматизация строительства: Сборник статей. Самара: СамГТУ, 2021. С. 121–125.
9. Патент № 2754842 С1 Российская Федерация, МПК F23J 11/00, E04F 17/02, E04N 12/28, F23L 17/02. Труба дымохода многоквартирного дома / *Л.И. Второва, С.Я. Галицков, О.В. Самохвалов.* № 2020129862: заявл. 09.09.2020; опубл. 08.09.2021, Бюл. № 25. 11 с.
10. *Самохвалов О.В., Второва Л.И.* Модель динамики образования конденсата в дымоходе многоэтажного здания в условиях нестационарности работы газовых котлов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии. Самара: СамГТУ, 2019. С. 670–676.
11. *Второва Л.И., Самохвалов О.В.* Определение коэффициента теплоотдачи дымохода при вариации режимов работы газовых котлов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии. Самара: СамГТУ, 2021. С. 975–982.
12. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1974. 712 с.
13. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
14. *Романенко П.Н.* Гидродинамика и теплообмен в пограничном слое (Справочник). М.: Энергия, 1974. 464 с.
15. *Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. 6-е изд., испр. и доп. М.: Физматгиз, 1963. 584 с.
16. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1966. 560 с.
17. *Самохвалов О.В.* Автоматизация технологического процесса обжига при производстве керамзита заданной прочности: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. 19 с.
18. SolidWorks Flow Simulations 2009 tutorial, 2009. RUS. 244 с.
19. *Галицков С.Я., Галицков К.С., Самохвалов О.В., Фадеев А.С.* Моделирование обжига керамзита в печи с регулируемой скоростью вращения как объекта управления // Научное обозрение. М., 2015. № 7. С. 227–237.
20. *Галицков К.С.* Синтез интеллектуальных систем управления производством бетонных изделий и керамических материалов // Промышленное и гражданское строительство. М., 2015. № 6. С. 59–63.

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2023 г.

MODELING OF THE REMOVAL OF COMBUSTION PRODUCTS IN THE PIPE OF A LOW-RISE BUILDING AS A CONTROL OBJECT

K.S. Galitskov, O.V. Samokhvalov, L.I. Vtorova *

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

E-mail: maes@samgtu.ru; indexcitir@gmail.com

Abstract. *The features of the formation and methods of preventing condensation in the chimney of an apartment low-rise building with an individual decentralized heat supply system are considered. A mathematical model of the technological process of removing flue gases from gas boilers in an apartment building through a collective chimney pipe as a multidimensional control object with distributed parameters, which is understood as a set of thermophysical processes occurring during the removal of combustion products. Numerical simulation of a collective chimney pipe is performed on the example of a three-storey apartment building with gas boilers installed in each apartment as a control object. A method of step-by-step experiments is proposed. At the first stage, the dependences of the distribution of the temperature field inside the chimney during non-stationary operation of boilers and changing ambient temperature are obtained. The phenomenon of condensate occurrence has been confirmed experimentally, and the most characteristic areas subject to its occurrence have been identified. During the second stage of research, it was found that it is most effective and economically feasible to prevent the formation of condensate by using a heating cable in the attic and chimney head sections. It is shown that the change of control actions has an effect on the temperature of adjacent sections of the chimney. The revealed non-stationarity is taken into account by inter-channel connections through the object in the block diagram. It is proved that, in relation to solving the problem of removing combustion products from the chimney, an object with distributed parameters can be represented by a model with concentrated parameters, for which the structure is synthesized and proper operators and operators of inter-channel connections are found in the form of transfer functions with variable parameters. The resulting model is problem-oriented to create a two-dimensional automatic temperature control system on the inner surface of the chimney in order to prevent the formation of condensate in the pipe.*

Keywords: *chimney, smoke extraction, heating, boiler, gas, heat transfer, mathematical model, control object with distributed parameters.*

REFERENCES

1. Vatuzov D.N., Puring S.M., Filatova E.B., Tyurin N.P. Vybór istochnika teplosnabzheniya zdaniy zhiloy zastrojki [Choice of heat source for residential buildings] // Vestnik SSUACE. Urban Construction and Architecture. 2014. № 4 (17). Pp. 86–91. (In Russian)
2. Aleshin A.N., Zelentsov D.V., Novopashina N.A. Razrabotka tekhnicheskoy politiki po kapital'nomu remontu sistem otopeniya i gazosnabzheniya mnogokvartirnykh domov v Samarskoj oblasti [Development of a technical policy for the overhaul of heating and gas supply systems of apartment buildings in the Samara region] // Science Review. 2014. № 9–3. Pp. 773–777. (In Russian)
3. Novopashina N.A. Pokvartirnoe otopenie – osnova realizacii dopolnitel'noj zastrojki territorij i ekonomii byudzhetykh investicij [Apartment-by-apartment heating is the basis for implementing additional development of territories and saving budget investments] // Socio-

* Konstantin S. Galickov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Oleg V. Samokhvalov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Larisa I. Vtorova, scientific candidate.

- economic problems in the development of the construction complex: Interuniversity jubilee collection of scientific papers. 2005. Pp. 77–80. (In Russian)
4. *Vatuzov D.N., Puring S.M., Filatova E.B.* Sposoby povysheniya racional'nogo potrebleniya i raspredeleniya teplovoj energii v zhilyh zdaniyah [Ways to increase the rational consumption and distribution of thermal energy in residential buildings] // Nauchnyj potencial regionov na sluzhbu modernizacii. Mezhvuzovskij sbornik. 2013. № 3 (6). Pp. 33–35. (In Russian)
 5. *Novopashina N.A., Balandina O.A.* Primenenie kondensacionnyh kotlov – kolonok dlya avtonomnogo teplosnabzheniya [The use of condensing boilers – columns for autonomous heat supply] // Tradicii i innovacii v stroitelstve i arhitekture: Materialy 69-j Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii po itogam NIR 2011 goda. Pp. 102–105. (In Russian)
 6. *Oreshin G.Yu.* Sovremennaya tekhnologiya zashchity, remonta, vosstanovleniya dymohodnyh i ventilyacionnyh kanalov ot korrozii, kondensata, razrusheniya s ispol'zovaniem polimernogo termoplasticheskogo vkladysya Furanfleks [Modern technology of protection, repair, restoration of chimney and ventilation ducts from corrosion, condensation, destruction using polymer thermoplastic liner Furanflex] // Engineering journal of Don. 2018. № 1 (48). P. 143 (In Russian)
 7. *Sosnin Yu.P., Bukharkin E.N.* Bytovye pechi, kaminy i vodonagrevateli [Household stoves, fireplaces and water heaters]. 2-e izd. M.: Strojizdat, 1990. 384 p. (In Russian)
 8. *Samokhvalov O.V., Vtorova L.I.* Proektirovanie krepeleniya ustrojstva obogreva v dymohode maloetazhnogo zdaniya [Design of the heating device mounting in the chimney of a low-rise building] // Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya stroitelstva: Sbornik statej. Samara: SSTU, 2021. Pp. 121–125. (In Russian)
 9. Patent № 2754842 C1 Russian Federation, Int. Cl F23J 11/00, E04F 17/02, E04H 12/28, F23L 17/02. Truba dymohoda mnogokvartirnogo doma [Chimney pipe of apartment building] / L.I. Vtorova, S.Ya. Galitskov, O.V. Samokhvalov. № 2020129862: Date of filing. 09.09.2020: Date of publication. 08.09.2021, Bull. № 25. 11 p. (In Russian)
 10. *Samokhvalov O.V., Vtorova L.I.* Model' dinamiki obrazovaniya kondensata v dymohode mnogoetazhnogo zdaniya v usloviyah nestacionarnosti raboty gazovyh kotlov [Model of condensate formation dynamics in the chimney of multilevel building under conditions non-stationary work of gas boilers] // Tradicii i innovacii v stroitelstve i arhitekture. Stroitelstvo i stroitelnye tekhnologii. Samara: SSTU, 2019. Pp. 670–676. (In Russian)
 11. *Vtorova L.I., Samokhvalov O.V.* Opredelenie koefitsienta teplootdachi dymohoda pri variacii rezhimov raboty gazovyh kotlov [Determination of chimney heat transfer coefficient at variation of operation modes of gas boilers] // Tradicii i innovacii v stroitelstve i arhitekture. Stroitelstvo i stroitelnye tekhnologii. Samara: SSTU, 2021. Pp. 975–982. (In Russian)
 12. *Schlichting G.* Teoriya pogrannichnogo sloya [Boundary-Layer Theory]. 5-e izd. M.: Nauka, 1974. 712 p. (In Russian)
 13. *Lojcyanskij L.G.* Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and gas mechanics]. 7-e izd. M.: Drofa, 2003. 840 p. (In Russian)
 14. *Romanenko P.N.* Gidrodinamika i teploobmen v pogrannichnom sloe [Hydrodynamics and heat transfer in the boundary layer] (Reference book). M.: Energiya, 1974. 464 p. (In Russian)
 15. *Kochin N.E., Kibel I.A., Roze N.V.* Teoreticheskaya gidromekhanika [Theoretical hydromechanics]. ch. 1. 6-e izd. M.: Fizmatgiz, 1963. 584 p. (In Russian)
 16. *Lykov A.V.* Teoriya teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]. M.: Vysshaya shkola, 1966. 560 p. (In Russian)
 17. *Samokhvalov O.V.* Avtomatizatsiya tekhnologicheskogo processa obzhiga pri proizvodstve keramzita zadannoj prochnosti: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.06. Samara: SSTU, 2018. 19 p. (In Russian)
 18. SolidWorks Flow Simulations 2009 tutorial, 2009. RUS. 244 p. (In Russian)
 19. *Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Samokhvalov O.V., Fadeev A.S.* Modelirovanie obzhiga keramzita v pechi s reguliruemoy skorost'yu vrashcheniya kak ob"ekta upravleniya [Modeling the calcination of ceramsite in a rotary furnace with regulated speed as a control object] // Science Review. Moscow. 2015. № 7. Pp. 227–237 (In Russian)
 20. *Galitskov K.S.* Sintez intellektual'nyh sistem upravleniya proizvodstvom betonnyh izdelij i keramicheskikh materialov [Synthesis of intelligent management systems of concrete products and ceramic materials production] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. Moscow. 2015. № 6. Pp. 59–63 (In Russian)

УДК 62-631.2:665.65

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ ГАЗОТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

С.А. Гулина, Л.П. Шелудько*

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

E-mail: kr_oeg@mail.ru, chel_lp@mail.ru

Предложен новый тип комбинированных газотурбодетандерных энергетических установок как эффективное системное решение для увеличения выработки электрической энергии и повышения тепловой экономичности ТЭЦ. Разработаны тепловые схемы и приведен принцип работы комбинированных энергетических установок нового типа для тепловой электростанции. Проведен термодинамический анализ параметров тепловых схем комбинированных энергетических газотурбодетандерных установок в зависимости от температуры наружного воздуха, электрической и тепловой нагрузок ТЭЦ, а также расхода природного газа, потребляемого ТЭЦ, через газораспределительный пункт. По результатам расчета проведена оптимизация параметров цикла энергетических установок, обеспечивающая заданную электрическую мощность и КПД газовой энергетической турбины. Установлено, что ее электрическая мощность и КПД зависят от величины расхода природного газа, подаваемого на ТЭЦ в разные месяцы года, и соответствующих температур воздуха. Наиболее эффективная комбинированная установка представляет собой систему, в которой турбодетандеры связаны с турбокомпрессорным валом типовой ГТУ или дополняющей типовую ГТУ турбодетандерным компрессорным блоком.

Ключевые слова: тепловая электростанция, компрессорная станция, газотурбинная установка, турбодетандер, природный газ, газораспределительный пункт, газотурбинная электростанция.

В Российской Федерации эксплуатируется самая мощная и протяженная газотранспортная система. Единая система газоснабжения – высокотехнологичный инженерный комплекс, объединяющий добычу, транспортировку, распределение, хранение и переработку природного газа.

Природный газ по трубопроводной магистральной системе транспортируется с давлением от 5,5 до 11,8 МПа. Перед подачей потребителям в специальном дроссельном оборудовании на газораспределительных станциях (ГРС) давление газа снижается. Для потребителей природный газ подается с давлением порядка 0,6 – 0,003 МПа, соответствующим техническим характеристикам газового оборудования, порядка. Технологический процесс газоснабжения потре-

* Светлана Анатольевна Гулина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».

Леонид Павлович Шелудько, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

бителей сопровождается колоссальным объемом недоиспользованной энергии давления природного газа.

Для повышения экономической эффективности использования потенциальной энергии природного газа (ПГ) широко применяются специальные расширительные машины — турбодетандеры. В этих установках происходит снижение давления газа с отдачей внешней работы на вал машины. Как правило, полученная полезная работа турбодетандера идет на привод электрогенератора или другого механического оборудования (компрессора, насоса) [1].

В европейских странах и в России уже получен большой опыт использования детандер-генераторных энергетических агрегатов. Их применение на ГРС с производительностью от 100 т.м³/час является весьма обоснованным.

Примеры успешной реализации включают установку крупных турбодетандерных агрегатов на ТЭЦ-21, ТЭЦ-23, Среднеуральской ГРЭС и Лукомльской ГРЭС. Однако были замечены некоторые проблемы, связанные с изменением мощности турбодетандеров и их влиянием на надежность и экономичность котельных агрегатов, куда подается расширенный в ДГА топливный газ с низкой температурой [2]. По этим причинам на ТЭЦ-21 и ТЭЦ-23 ДГА были выведены из эксплуатации.

Применение газотурбодетандерных энергетических установок представляется наиболее эффективным решением для увеличения выработки электрической энергии и повышения тепловой экономичности ТЭЦ [3, 4]. В западных странах уже применяются детандер-генераторные агрегаты (ДГА), которые генерируют электроэнергию с использованием избыточного давления природного газа на ТЭС. На базе завода «Криокор» были установлены ДГА-5000 на ТЭЦ-21 и ТЭЦ-23 Мосэнерго, а также на Среднеуральской ГРЭС и Лукомльской ГРЭС. Для повышения эффективности ДГА перед ними производится предварительный подогрев газа с использованием тепла сетевой воды. Заводом-изготовителем были установлены ограничения по максимальной температуре ПГ перед ДГА не выше 80 °С и температуре газа на выходе не ниже -20 °С. При низкой конечной температуре ПГ за ДГА увеличивается расход топлива в котлах, связанный с тем, что при ряде рабочих режимов ТЭЦ температура ПГ за ДГА становится отрицательной и приводит не к увеличению, а к снижению тепловой экономичности ТЭЦ. В этих условиях выбор источника подогрева газа является одним из основных при создании эффективных ДГА.

Важно отметить, что решения по созданию эффективных ДГА для использования избыточной энергии давления газа при его редуцировании имеются преимущественно для производства электрической энергии. Однако при адиабатном расширении газа с отдачей внешней работы температура рабочего тела понижается, что может привести к снижению тепловой экономичности ТЭЦ.

По мнению авторов, наиболее эффективным направлением, обеспечивающим увеличение выработки электрической энергии и повышение тепловой экономичности, является применение на ТЭЦ комбинированных газотурбодетандерных энергетических установок (КТГДУ). На рис. 1 приведена тепловая схема нового типа комбинированной энергетической установки ТЭЦ.

На ТЭЦ топливный газ после ГРС с давлением $P_{ГРС} = 1,2$ МПа поступает в блок регулирования топливного газа для котельной установки (КУ) с давлением $P_{вх.БПКУ} = 0,125$ МПа. Суммарная степень понижения давления в ТД5 и ТД6 составила $\pi_{ТД5,6} = 8,37$. Она определяется по перепаду давления на входе в ТД5

и выходе из ТД6 с учетом гидравлических потерь в трубопроводных коммуникациях, которые составляют не более 4 %. Задаемся температурой природного газа на выходе из теплообменных аппаратов 2 и 3 перед турбодетандерами (ТД) 5 и 6. При заданном перепаде давления температура ПГ на выходе из турбодетандеров 5 и 6 должна иметь положительное значение, чтобы исключить гидратообразование.

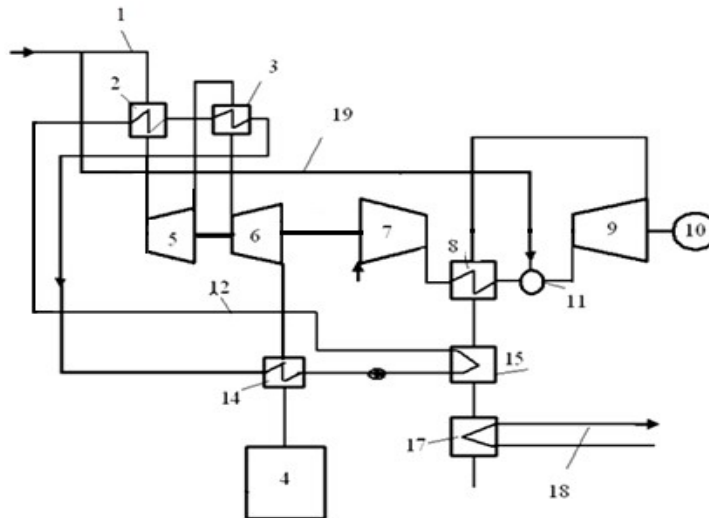


Рис. 1. Схема энергетической ГТДУ в составе ТЭЦ:

1 – газопровод высокого давления 1,2 МПа; 2 – теплообменный аппарат ПГ; 3 – теплообменный аппарат ПГ; 4 – котельный агрегат; 5 – турбодетандер высокого давления; 6 – турбодетандер низкого давления; 7 – воздушный компрессор; 8 – теплообменный аппарат КГТДЭУ; 9 – газовая турбина; 10 – электрогенератор; 11 – камера сгорания КГТДЭУ; 12 – трубопровод горячего теплоносителя; 13 – теплообменный аппарат топливного газа КУ; 14 – теплообменный аппарат топливного газа КУ; 15 – газовойодяной утилизационный теплообменник; 16 – трубопроводы сетевой воды теплосети; 17 – теплообменный аппарат подогрева сетевой воды; 18 – трубопроводы сетевой воды теплосети

Газ с давлением 1,2 МПа подогревают в теплообменном аппарате (ТА) 2 теплом теплоносителя от $T_{\text{ex ТД5}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, расширяют в ТД высокого давления 2 до давления 0,5–0,6 МПа, подогревают в ТА низкого давления 3 $T_{\text{ex ТД5}} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, расширяют в ТД низкого давления 6 до 0,12–0,125 МПа, подогревают теплоносителем в ТА подогрева газа 14 до температуры 40–50 $^{\circ}\text{C}$ и подают в блок регулирования топливного газа для горелок котельных агрегатов ТЭЦ 4. Теплоноситель для ТА 2, 3 и 14 нагревают в утилизационном ТА 15 теплом уходящих газов после расширения в газовой турбине 9. Далее после ТА 15 теплом выхлопных газов подогревают сетевую воду теплосети в ТА подогрева сетевой воды 17.

В камеру сгорания 11 газовой турбины 9 подают сжатый воздух после компрессора 7. Полезную работу турбодетандеров 5 и 6 используют для привода компрессора 7, а полезную работу газовой турбины 9 – для дополнительной выработки электроэнергии.

Удельная работа расширения в ТД 5 и в ТД 6 определяется по зависимостям [5, 6], кДж/кг:

$$L_{TD(5,6)} = c_{P_{III}} \cdot T_{вхTD(5,6)} \cdot \left(1 - \pi_{TD(5,6)}^{-m_{III}}\right) \cdot \eta_{TD(5,6)}, \quad m_{III} = \frac{k_{III} - 1}{k_{III}},$$

где η_{TD} – изоэнтروпический КПД турбины; $\eta_{TD} = 0,9$; $c_{P_{III}}$ – изобарная удельная теплоемкость природного газа; $c_{P_{III}} = 2,208$ кДж/Ккг; k_{III} – показатель адиабаты ПГ, $k_{III} = 1,31$.

Температуры рабочего тела за ТД 5 и ТД 6, К:

$$T_{TD(5,6)} = T_{вхTD(5,6)} - \frac{L_{TD(5,6)}}{c_{P_{III}}}.$$

При выбранных температурах топливного газа на выходе из теплообменных аппаратов 2 и 3 после расширения в турбодетандерах 5 и 6 температура топливного газа составила более 26 и 10 °С соответственно. Если по техническим характеристикам давление природного газа после ГРС будет 2,5 МПа, то температуру подогрева в теплообменных аппаратах нужно увеличить для избегания гидратообразования в трубопроводных коммуникациях.

Мощность турбодетандерной установки, МВт:

$$N_{TD} = (L_{T5} + L_{T6}) \cdot G_{мзКУ} \cdot \eta_M,$$

где $G_{мзКУ}$ – расход топливного газа для котлов ТЭЦ, кг/с; η_M – КПД механических потерь.

На рис. 2 показано изменение расхода топливного газа $G_{ГРП}$ по месяцам года для ТЭЦ с номинальной мощностью 450 МВт. В зависимости от времени года, величин электрической и тепловой нагрузок ТЭЦ расход топливного газа, подаваемого ГРС, изменяется от 5 до 37 кг/с.

Суммарная мощность ТД 5 и ТД 6 прямо пропорциональна расходу природного газа через ТЭЦ и изменяется от 11,85 до 1,95 МВт. Всю мощность турбодетандеров 5 и 6 используют для привода компрессора 7. Оценим основные теплофизические параметры компрессора с учетом располагаемого потенциала газовых турбодетандеров. Баланс мощности турбодетандеров 5, 6 и мощности, потребляемой воздушным компрессором 7:

$$N_{K7} = (N_{T5} + N_{T6}) \cdot \eta_M \quad \text{и} \quad L_{K7} G_{вГТУ} = (L_{T5} + L_{T6}) \cdot G_{мзКУ} \cdot \eta_M,$$

где $G_{вГТУ}$ – расход воздуха через компрессор 7 для ГТУ, кг/с; L_{K7} – удельная работа сжатия в компрессоре, кДж/кг.

Природный газ, поступающий с ГРС на ТЭЦ, разделяется на два потока. Основной поток – топливный газ для КУ ТЭЦ; дополнительный поток – топливный газ для ГТУ. Суммарный массовый расход природного газа:

$$G_{ГРС} = G_{мзКУ} + G_{мзГТУ} \quad \text{и} \quad m = \frac{G_{мзКУ}}{G_{ГРС}},$$

где m – отношение расхода топливного газа через КУ к суммарному расходу газа через ТЭЦ.

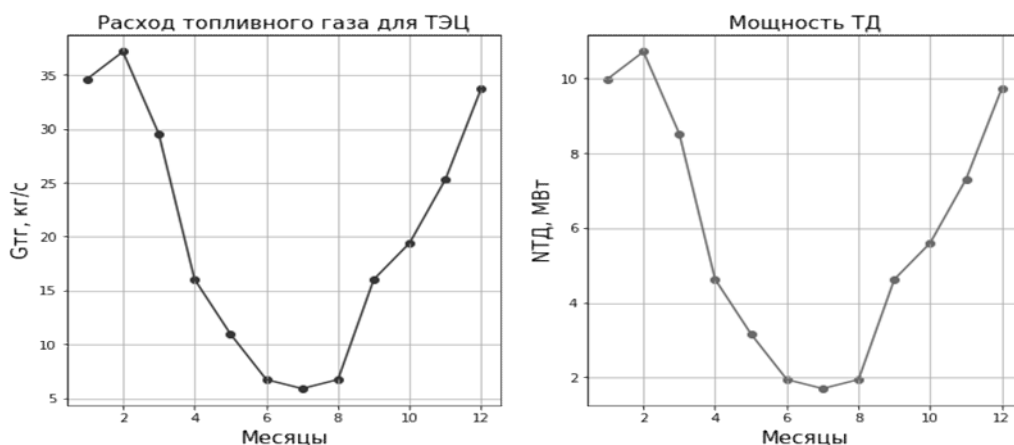


Рис. 2. Изменение расхода природного газа $G_{ТГ}$, подаваемого на ТЭЦ от ГРП, и располагаемой мощности турбодетандеров по месяцам года

В соответствии с методикой, приведенной в [2, 3], удельная работа сжатия в компрессоре, кДж/кг, определяется по формуле

$$L_{K7} = c_{P_6} \cdot T_{BxK7} \cdot (\pi_{K7}^{m_6} - 1) \cdot \frac{1}{\eta_{K7}} \text{ и } m_6 = \frac{k_6 - 1}{k_6},$$

где η_{K7} – изоэнтروпический КПД компрессора; c_{P_6} – изобарная удельная теплоемкость воздуха, $c_{P_6} = 1,01$ кДж/Ккг; k_6 – показатель адиабаты воздуха, $k_6 = 1,4$.

Подставляя удельную работу сжатия L_{K7} в уравнение баланса мощности, получаем уравнение, связывающие параметры ТД и компрессора:

$$(\pi_{K7}^{m_6} - 1) G_{6ГТУ} = \frac{G_{ГРС} \cdot \eta_{K7}}{c_{P_6} \cdot T_{BxK7}} m (L_{T5} + L_{T6}) \eta_M.$$

Мощность, потребляемая компрессором, зависит от степени повышения давления π_{K7} и расхода воздуха через компрессор $G_{6ГТУ}$. Задаемся π_{K7} в диапазоне от 2 до 14 и рассчитываем расход воздуха по зависимости

$$G_{6ГТУ} = \frac{G_{ГРС} \cdot \eta_{K7}}{c_{P_6} \cdot T_{BxK7} \cdot (\pi_{K7}^{m_6} - 1)} (L_{T5} + L_{T6}) m \cdot \eta_M.$$

По результатам расчета на рис. 3 построены графические зависимости изменения расхода воздуха в КГТДУ.

Во всем диапазоне располагаемой мощности газовых турбодетандеров расход воздуха через компрессор изменяется в зимний период от 140 до 25 кг/с и в летний период от 30 до 5 кг/с. С ростом степени повышения давления в воздушном компрессоре расход воздуха снижается. Следовательно, на электрическую мощность КГТДКУ влияние оказывает расход природного газа через ТЭЦ, и усиливает это влияние зависимость параметров воздушного компрессора от расхода газа через ТЭЦ.

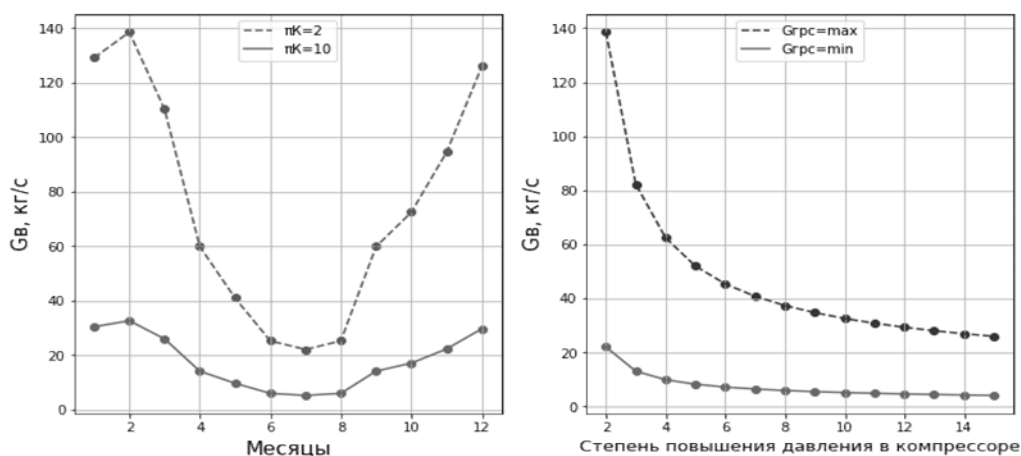


Рис. 3. Изменение расхода воздуха через компрессор в зависимости от расхода природного газа $G_{ТГ}$, подаваемого на ТЭЦ, и степени повышения давления в компрессоре

Удельная работа турбины электрогенератора определяется:

$$L_{T9} = c_{P_z} T_G \left(1 - \pi_{T9}^{-m_z} \right) \eta_{T9}, \quad m_z = \frac{k_z - 1}{k_z}, \quad \pi_{T9} = \pi_{K7} \cdot \sigma_{zud},$$

где T_G – температура газа перед турбиной, К; π_{T9} – степень понижения давления в турбине; σ_{zud} – гидравлические потери давления в тракте ГТУ; η_{T9} – изоэнтропический КПД турбины; c_{P_B} – изобарная удельная теплоемкость газа, $c_{P_B} = 1,15$ кДж/Ккг; k_z – показатель адиабаты газа, $k_z = 1,4$.

Удельная работа турбины пропорционально зависит от температуры в камере сгорания и степени повышения давления в компрессоре. Также будет увеличиваться и КПД установки. Используя зависимость, предложенную в методике [5, 6], эффективный КПД определим по формуле

$$\eta_e = \frac{L_{T9}}{Q_1} \cdot \eta_{KC}.$$

Удельная теплота, подводимая в цикле с топливом, кДж/кг:

$$Q_1 = c_{P_z} T_G \cdot v_{exK7-exT9} - c_{P_g} T_R \cdot v_{Bx-K7} \quad \text{и} \quad T_R = r \cdot (T_{ЭТ9} - T_{K7}) + T_{K7},$$

$$v_{ex-exK7} = 1 - q_{ym} - q_{охл} \quad \text{и} \quad v_{exK7-exT9} = 1 - q_{ym} - q_{охл} + q_{мон},$$

где $v_{ex-exK7}$, $v_{exK7-exT9}$ – коэффициенты изменения массы рабочего тела на входе в камеру сгорания и в турбину; T_K и T_R – температуры рабочего тела на выходе из компрессора и из теплообменного аппарата 8; η_{KC} – коэффициент полноты сгорания топлива; q_{ym} ; $q_{охл}$; $q_{мон}$ – относительные расходы рабочего тела на охлаждение и утечки топлива (задаются из опыта эксплуатации ГТУ).

На рис. 4 построены графические зависимости удельной полезной работы турбины электрогенератора и КПД установки.

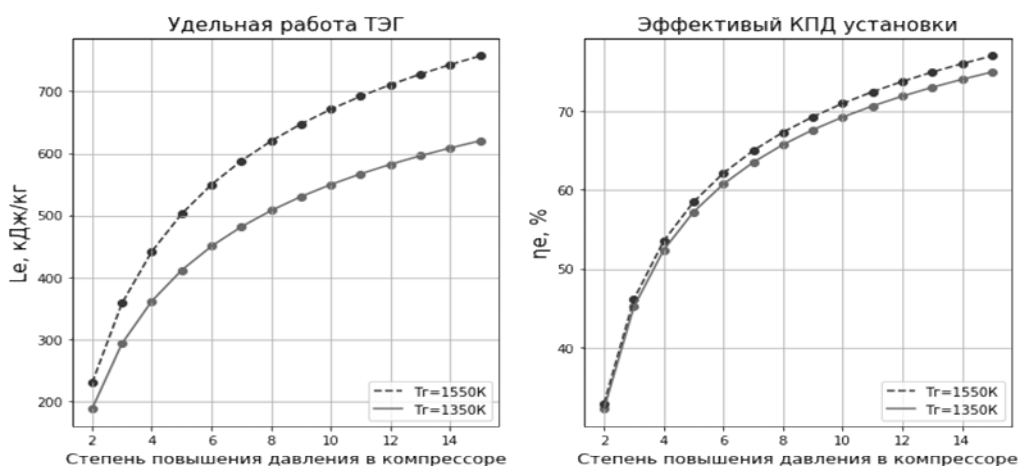


Рис. 4. Изменение параметров эффективности КГТДЭУ в зависимости от степени повышения давления в компрессоре π_{K7} и температуры газа перед турбиной

Эффективность предложенной схемы очевидна. Для ТЭЦ с номинальной мощностью 450 МВт, работающей на природном газе, применение комбинированной газотурбодетандерной установки позволит получить дополнительную электрическую мощность за счет использования газотурбинной установки с КПД 65–70 % установки.

Электрическая мощность КГТДКУ для схемы, указанной на рис. 1, рассчитана по методике [5, 6] в диапазоне расхода природного газа через ТЭЦ в течение года:

$$N_{T9} = G_{eT9} \cdot L_{T9} \cdot \eta_M = c_{p_e} T_G (1 - \pi_{T9}^{-m_e}) \eta_{T9} \eta_M,$$

где G_{eT9} – расход газа через энергетическую турбину, кг/с, определяется:

$$G_{eT9} = G_{eITU} \cdot v_{exK7-exT9}, \quad v_{exK7-exT9} = 1 - q_{yt} - q_{охл} + q_{мон}.$$

Для температуры газа перед турбиной $T_G = 1350$ К и $T_G = 1550$ К для степени повышения давления $\pi_{K7} = 2$ и $\pi_{K7} = 10$ в диапазоне расхода природного газа через ТЭЦ построены графические зависимости изменения мощности турбины электрогенератора (рис. 5).

Мощность турбины электрогенератора зависит от расхода воздуха через компрессор. Как было установлено ранее, расход воздуха через компрессор с ростом степени повышения давления в нем снижается. Следовательно, эти два параметра противоположно влияют на мощность турбины электропривода. На рис. 6 приведена графическая зависимость изменения электрической мощности турбины электрогенератора от степени повышения давления в компрессоре π_{K7} .

Несмотря на рост удельной работы расширения турбины электрогенератора (см. рис. 4) мощность турбины снижается с ростом степени повышения давления, так как снижается расход воздуха через компрессор. Установлено, что увеличение степени повышения давления π_K в воздушном компрессоре К7 приводит к росту КПД установки, но при этом снижает ее электрическую мощность и приводит к одновременному удорожанию конструкции самого компрессора. При степени повышения давления в диапазоне от 4 до 10 можно получить КПД от 55 до 70 % и мощность установки от 12 до 16,5 МВ для среднегодового значе-

ния расхода газа через ТЭЦ $G_{ГРС} = 22$ кг/с. Это доказывает высокую эффективность предложенной схемы.

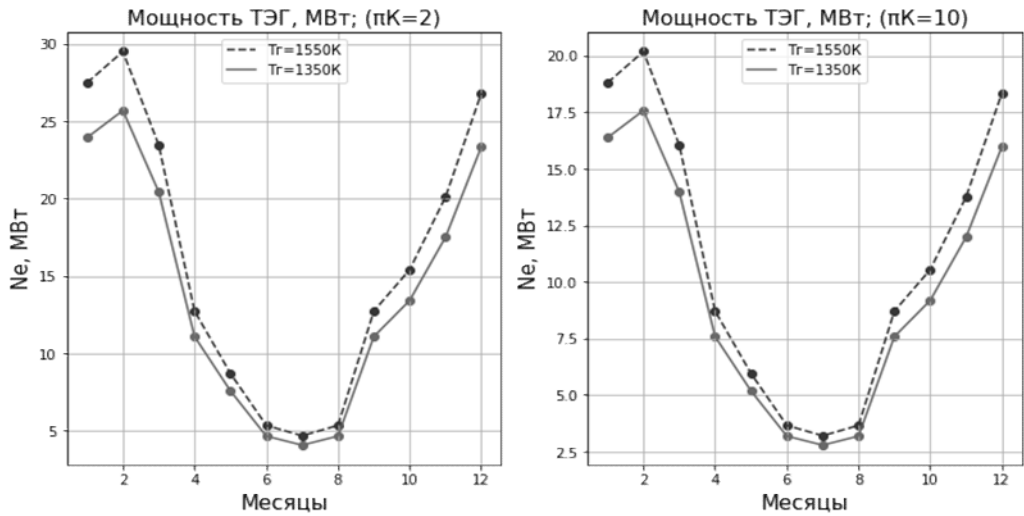


Рис. 5. Изменение электрической мощности турбины электрогенератора в зависимости от расхода природного газа $G_{ГГ}$, подаваемого на ТЭЦ

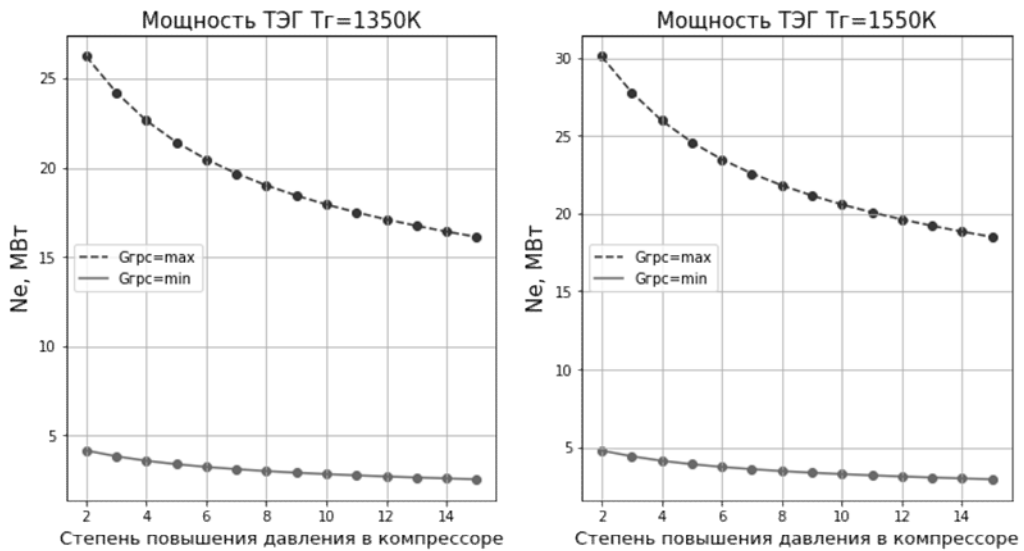


Рис. 6. Изменение электрической мощности турбины электрогенератора в зависимости от степени повышения давления в компрессоре π_{K7}

Тем не менее подобная схема имеет существенный недостаток – зависимость параметров воздушного компрессора от расхода топливного газа на ТЭЦ. Снижение расхода воздуха через компрессор в летний период приведет к возникновению критических положительных углов атаки на лопатках компрес-

сора и помпажу. Необходима дополнительная мощность, подводимая к компрессору, для поддержания расхода воздуха через компрессор в заданных пределах, что дополнительно скажется и на мощности энергетической турбины.

Также нужно учитывать влияние температуры окружающего воздуха на параметры компрессора. Определен расход воздуха через компрессор 7 и его потребляемая мощность по зависимостям

$$G_{гТУ} = G_{впргТУ} \frac{P_{вхК7} \sqrt{288}}{101,3 \sqrt{T_{вхК7}}}, \quad N_{К7} = N_{нрК7} \frac{P_{вхК7} \sqrt{T_{вхК7}}}{101,3 \sqrt{288}},$$

где за приведенные параметры $G_{впргТУ}$ и $N_{нрК7}$ взяты расход и мощность, определенные при стандартных атмосферных условиях ($P = 101,3$ кПа, $T = 288$ К).

На рис. 7 представлены графические зависимости коэффициента климатического влияния температуры атмосферного воздуха на расход воздуха и мощность компрессора от температуры окружающего воздуха и количественное изменение удельной полезной работы КГТДУ.

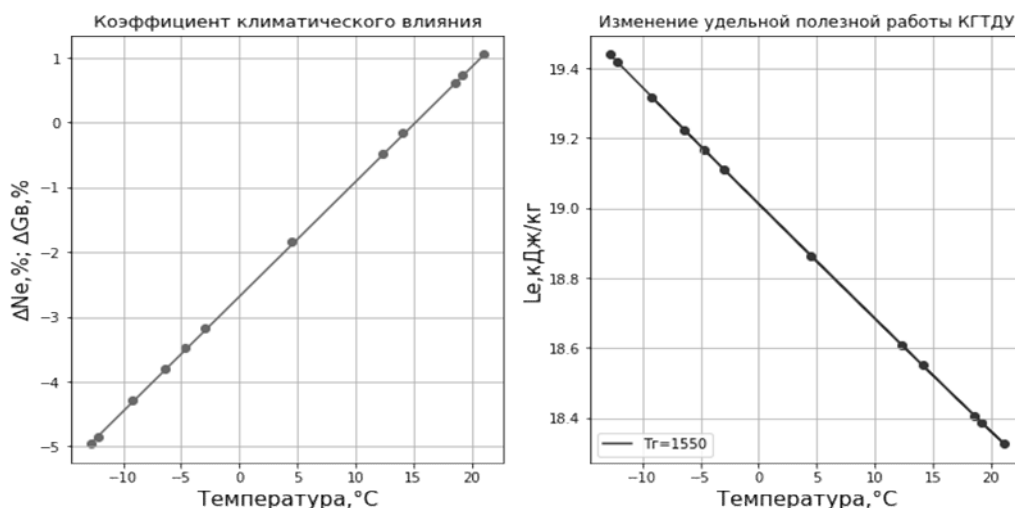


Рис. 7. Коэффициент климатического влияния на мощность и расход воздуха в КГТДУ и изменение удельной полезной работы от среднемесячной температуры окружающего воздуха

Мощность, потребляемая компрессором, в зимний период снижается на 5 %, а летом, в жаркое время, увеличивается на 1 %; следовательно, полезная мощность энергетической турбины 9 изменится аналогично. Снижение расхода топливного газа для ТЭЦ снизит мощность энергетической турбины в 6 раз.

Следовательно, необходимо регулировать работу компрессора при наличии двух возмущающих воздействий: изменения температуры окружающего воздуха и расхода природного газа через ТЭЦ. Использование входного регулируемого направляющего аппарата будет недостаточно, нужен еще один регулирующий фактор, в качестве которого может быть топливный клапан камеры сгорания ГТУ. Но для этого необходимо установить механическую связь между компрессором 7 и турбиной 9. Это позволит уйти от зависимости вырабатываемой электрической мощности от расхода газа в котле-утилизатора ТЭЦ. В летний период стабильность вырабатываемой мощности установки будет поддерживаться уве-

личением расхода топлива КГТДУ и стабилизацией параметров компрессора. Схема приведена на рис. 8.

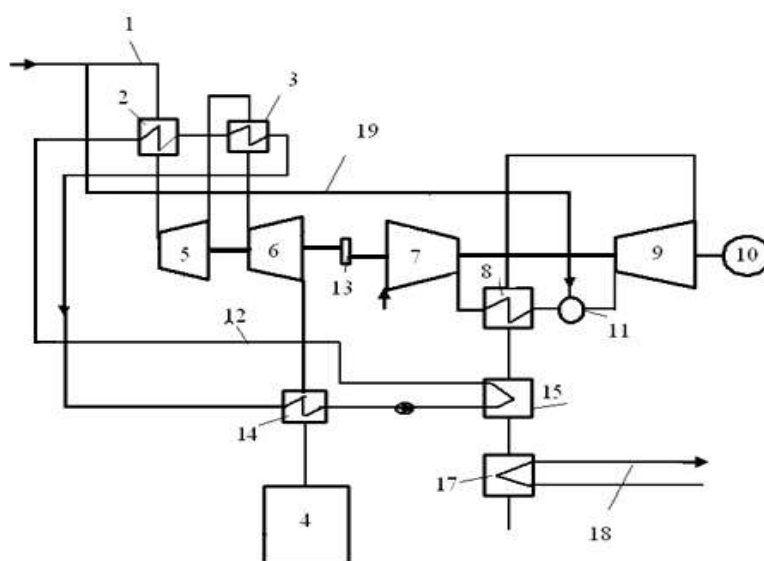


Рис. 8. Схема однофазной комбинированной энергетической газотурбодетандерной установки ТЭЦ: 1 – газопровод высокого давления 1,2 Мпа; 2 – теплообменный аппарат ПГ; 3 – теплообменный аппарат ПГ; 4 – котельный агрегат; 5 – турбодетандер высокого давления; 6 – турбодетандер низкого давления; 7 – воздушный компрессор; 8 – теплообменный аппарат КГТДЭУ; 9 – газовая турбина; 10 – электрогенератор; 11 – камера сгорания КГТДЭУ; 12 – трубопровод горячего теплоносителя; 13 – редуктор; 14 – теплообменный аппарат топливного газа КУ; 15 – газовойодяной утилизационный теплообменник; 16 – трубопроводы сетевой воды теплосети; 17 – теплообменный аппарат подогрева сетевой воды; 18 – трубопроводы сетевой воды теплосети

Принципиальным отличием этой схемы является механическая связь между компрессором 7 и турбиной 9. Компрессор 7 через редуктор 13 связан с турбодетандерами 5 и 6. Используя зависимости в методике [1, 2], рассчитаем основные термодинамические показатели данной схемы и определим их оптимальные значения для оценки максимальной эффективности установки для данного типа ТЭЦ.

Баланс мощности данной установки включает мощности, вырабатываемые турбодетандерами ТД5, ТД6, энергетической газовой турбиной Т9, и мощность, потребляемую воздушным компрессором К7 и электрогенератором 10, и определяется уравнением

$$N_e + N_{K7} = [(N_{T5} + N_{T6}) \cdot \eta_{ред} + N_{T9}] \cdot \eta_M.$$

Удельная полезная работа комбинированной энергетической установки определяется по зависимости

$$L_e = \frac{[G_{m2KV} (L_{T5} + L_{T6}) \eta_{ред} + L_{T9}] \cdot \eta_M}{G_{eГТУ}} - L_{K7},$$

где $\eta_{ред}$ – КПД редуктора.

Механическая, жесткая связь между компрессором и энергетической турбиной дает возможность с учетом опыта проектирования осевых компрессоров задаться расходом воздуха через компрессор от 25 до 125 кг/с.

КПД установки определяется аналогично схеме рис. 2. Для осредненного расхода топливного газа для ТЭЦ, равного 20 кг/с, в зависимости от степени повышения давления в компрессоре 7 рассчитаны изменения удельной полезной работы турбины 9 и эффективного КПД установки (рис. 9).

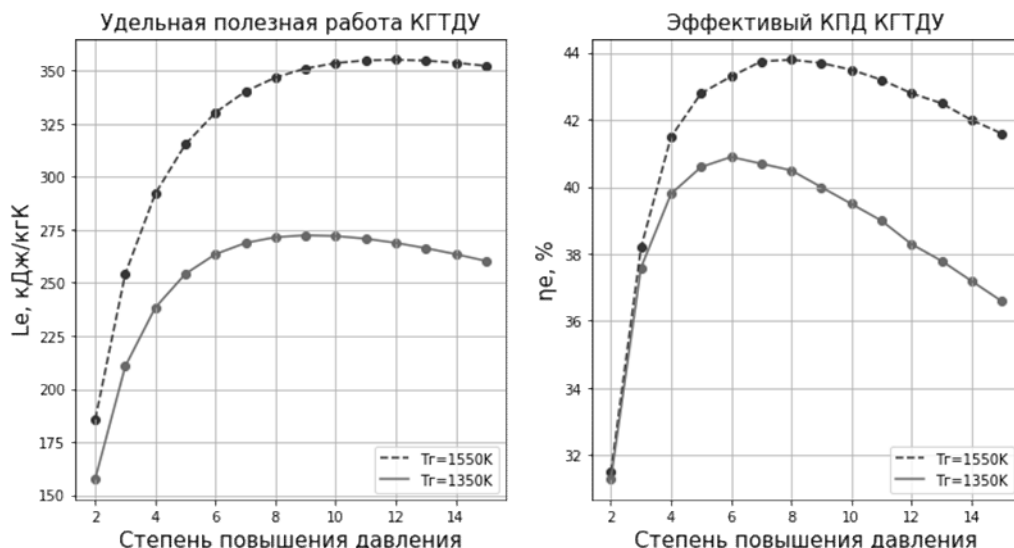


Рис. 9. Зависимости удельной полезной работы и эффективного КПД КГТДУ от степени повышения давления в компрессоре К7

При температуре $T_r = 1350\text{ K}$ перед Т 9 максимальные значения эффективного КПД получаются при степени повышения давления в компрессоре $\pi_{K7} = 6$, удельной полезной работы КГТДУ – при $\pi_{K7} = 9$. При температуре $T_r = 1550\text{ K}$ максимальные значения эффективного КПД – при $\pi_{K7} = 8$, удельной полезной работы КГТДУ – при $\pi_{K7} = 12$. По величине с ростом температуры T_r параметры эффективности увеличиваются в среднем от 7 до 30 %.

На основе полученных данных целесообразно задаться высокой температурой газа 1550 К и степенью повышения давления не более 8 (задаемся $\pi_{K7} = 8$). Рассчитаем параметры эффективности установки (рис. 10) в зависимости от расхода топливного газа через ТЭЦ и расхода воздуха через компрессор в диапазоне от 25 до 125 кг/с.

Соответственно, чем больше расход воздуха через компрессор 7 при заданной степени повышения давления ($\pi_{K7} = 8$), тем более мощна установка, но КПД такой установки приближается к КПД обычной ГТУ регенеративного цикла.

Для типового расхода воздуха через ГТУ в среднем 60 кг/с при минимальной располагаемой мощности турбодетандера можно получить мощность КГТДУ от 20 МВт с КПД более 36 %. При увеличении расхода газа через ТЭЦ КПД установки увеличивается более 45 %, и если нет необходимости в увеличении мощности ГТ, экономичность КГТУ увеличивается.

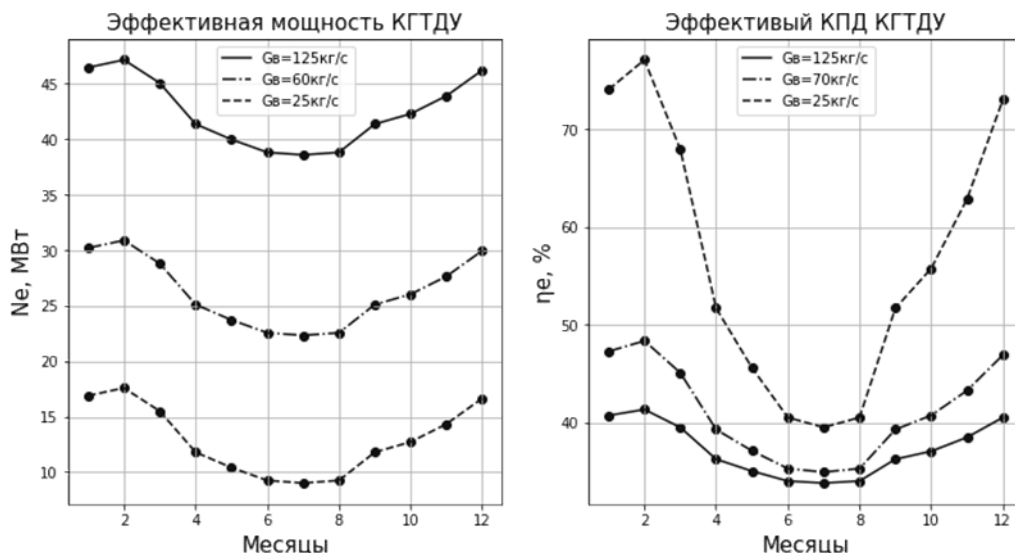


Рис. 10. Зависимости эффективной мощности и эффективного КПД КГТДУ от расхода топливного газа через ТЭЦ

Недостаток схемы – это наличие редуктора 13, что снижает мощность, передающуюся компрессору 7, и его термодинамические параметры. Частота вращения ротора КГТД во всем диапазоне режима работы должна быть постоянной (50 Гц). Следовательно, установка рассчитывается на минимальные параметры топливного газа через ТЭЦ. При увеличении расхода газа через ТЭЦ давление за компрессором 7 будет увеличиваться и расход топлива для КГТДУ снижается для поддержания постоянных оборотов турбины 9.

Данных недостатков лишена трехвальная схема КГТДУ (рис. 11). Компрессор низкого давления 7 механически связан с турбодетандерами 5 и 6. Его производительность зависит только от расхода природного газа через ТЭЦ. Обеспечение заданного режима работы КГТДУ при изменении расхода топливного газа или климатических условий осуществляется за счет регулирования расхода топливного газа для КГТДУ.

Данная схема позволяет исключить наличие редуктора у компрессора 7 и сохранить расход воздуха через ГТУ при изменении расхода природного газа через ТЭЦ на постоянном уровне за счет изменения частоты вращения ротора газогенератора, при постоянных оборотах ротора энергетической турбины 9. Разделение компрессора на два каскада повышает запас устойчивой его работы в целом, а наличие свободной силовой турбины электрогенератора позволяет поддерживать частоту вращения ротора электрогенератора во всем диапазоне возмущающих факторов (изменение мощности турбодетандеров, температуры окружающего воздуха) за счет одного регулирующего органа – расхода топливного газа через КГТДУ.

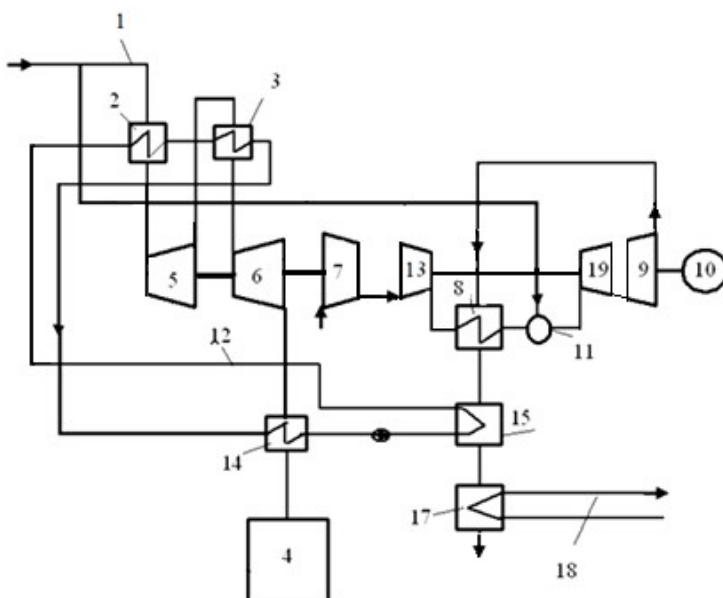


Рис. 11. Схема трехвальной энергетической КГТДУ в составе ТЭЦ: 1 – газопровод высокого давления 1,2 Мпа; 2 – теплообменный аппарат ПГ; 3 – теплообменный аппарат ПГ; 4 – котельный агрегат; 5 – турбодетандер высокого давления; 6 – турбодетандер низкого давления; 7 – компрессор низкого давления; 8 – теплообменный аппарат КГТДЭУ; 9 – газовая турбина; 10 – электрогенератор; 11 – камера сгорания КГТДЭУ; 12 – трубопровод горячего теплоносителя; 13 – компрессор высокого давления; 14 – теплообменный аппарат топливного газа КУ; 15 – газовойодяной утилизационный теплообменник; 16 – турбина компрессора высокого давления; 17 – теплообменный аппарат подогрева сетевой воды; 18 – трубопроводы сетевой воды теплосети; 19 – турбина компрессора высокого давления

Оценка эффективных параметров данной схемы проводится с учетом баланса мощности, вырабатываемой турбодетандерами ТД 5, ТД 6, и мощности, потребляемой воздушным компрессором К7, далее – турбодетандерный компрессорный блок (ТДКБ):

$$N_{K7} = (N_{T5} + N_{T6}) \eta_M.$$

Из данного уравнения, задавшись расходом воздуха через КГТДУ, определяем степень повышения давления в компрессоре ТДКБ:

$$\pi_{K7} = \left(\frac{(L_{T5} + L_{T6}) G_{m2KY} \eta_M \eta_{K7}}{c_p T_{6xK7} \cdot G_{6ITY}} + 1 \right)^{\frac{1}{m}}.$$

Расчетная степень повышения давления в компрессоре 7 для двух значений расхода воздуха через КГТДУ в зависимости от расхода природного газа через ТЭЦ представлена на графике (рис. 12).

Баланс мощности для КГТДУ состоит из двух уравнений:

$$N_{K13} = N_{T19} \cdot \eta_M \text{ и } N_e = N_{T9} \cdot \eta_M.$$

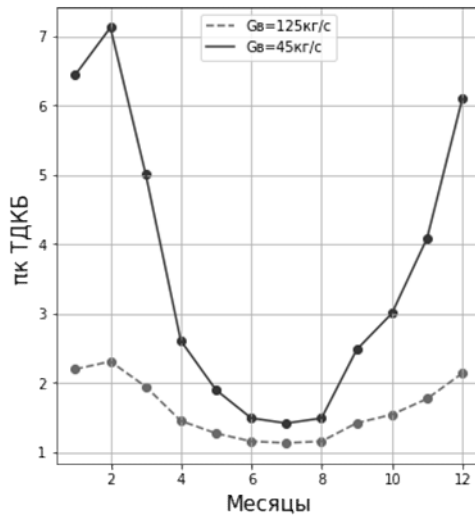


Рис. 12. Зависимость степени повышения давления в компрессоре ТДКБ в зависимости от расхода топливного газа через ТЭЦ

Удельная полезная работа комбинированной энергетической установки определяется по зависимости

$$L_e = L_{T9} v_{\text{exK} - \text{exT}9} \cdot \eta_M, \quad L_e = c_{P_e} T_{\text{exT}9} \left(1 - \pi_{T9}^{-m_e}\right) \eta_{T9} \eta_M v_{\text{exK} - \text{exT}9},$$

$$\pi_{T9} = \frac{\pi_{K7} \cdot \pi_{K13} \cdot \sigma_{\text{зид}}}{\pi_{T19}} \quad \text{и} \quad T_{\text{exT}9} = T_{\Gamma} - \frac{L_{T19}}{c_{P_e}} = T_{\Gamma} - \frac{L_{K13}}{c_{P_e} \cdot v_{\text{exK} - \text{exT}19} \cdot \eta_M},$$

где $T_{\text{exT}9}$ — температура газа перед турбиной 9, К; π_{T9} — степень понижения давления в турбине; $\sigma_{\text{зид}}$ — гидравлические потери давления в тракте ГТУ; η_{T9} — изоэнтропический КПД турбины; $v_{\text{exK} - \text{exT}19}$ — коэффициент изменения массы рабочего тела в КГТДУ.

Для схемы с одновальной КГТДУ (см. рис. 8) была определена оптимальная степень повышения давления в цикле КГТДУ. С учетом того, что все схемы КГТДУ выполнены по регенеративному циклу, для достижения максимальной эффективности такого цикла необходимы небольшие значения степени повышения давления в компрессоре и высокие температуры газа перед турбиной. Аналогично и для трехвальной схемы КГТДУ (см. рис. 11) максимальные значения эффективного КПД и удельной полезной работы КГТДУ при температуре $T_{\Gamma} = 1550$ К достигаются при суммарной степени повышения давления в компрессорах $8 \leq \pi_{\text{КС}} \leq 12$ соответственно.

Оптимальными параметрами трехвальной схемы КГТУ для заданного расхода природного газа ТЭЦ являются температура перед турбиной $T_{\Gamma} = 1550$ К и суммарная степень повышения давления в компрессорах, соответствующая максимальному КПД установки $\pi_{\text{КС}} = 8$. Расход воздуха через КГТДУ с учетом графической зависимости (рис. 13) должен быть не менее от 45 кг/с. При меньшем расходе воздуха в КГТДУ 45 кг/с на режиме максимальной мощности турбодетандеров 5, 6 степень повышения давления в компрессоре 7 увеличивается и станет больше суммарной степени повышения давления. Это приведет к от-

ключению газогенератора (компрессора 13, камеры сгорания и турбины 19) и получим установку, выполненную по схеме рис. 1.

Рассчитаны параметры эффективности трехвальной КГТДУ при температуре в цикле $T_f = 1550$ К в зависимости от расхода топливного газа через ТЭЦ и расхода воздуха через компрессор в диапазоне от 45 до 125 кг/с.

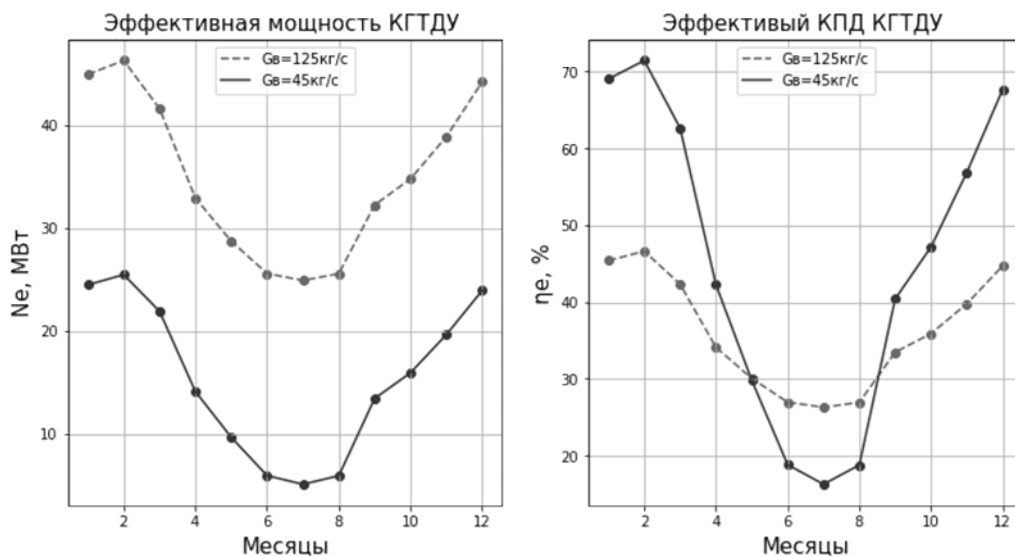


Рис. 13. Зависимости параметров эффективности трехвальной КГТДУ от расхода топливного газа через ТЭЦ

Мощность КГТДУ составила от 4 до 45 МВт (в зависимости от производительности ТЭЦ) и увеличивается пропорционально заданному расходу воздуха в КГТДУ. Снижение КПД установки будет существеннее с уменьшением мощности турбодетандеров 5 и 6 (при одинаковых параметрах цикла с регенерацией теплоты уходящих газов) для меньшего значения расхода воздуха через КГТДУ, при режимах пониженной производительности ТЭЦ и при небольших расходах рабочего тела у КГТДУ.

Полученные выводы позволяют применить уже находящиеся в эксплуатации энергетические газотурбинные установки с несколькими каскадами компрессоров и свободной силовой турбиной. Использование энергии природного газа при его дросселировании актуально на всех производственных объектах. Для типовой ГТУ со свободной силовой турбиной (паспортные данные приведены в таблице) оценим эффективность ее использования для выбранной ТЭЦ.

Газотурбинные установки авиационного типа НК-37СТ и НК-16СТ (см. таблицу) имеют многовальтный газогенератор, НК-12СТ снабжен одновальным газогенератором. Для установок НК-37СТ и НК-16СТ компрессор низкого давления отключается от турбины ГТУ и подключается к турбодетандерам 5 и 6. Для установки НК-12СТ предварительно изготавливается турбокомпрессорный блок, состоящий из турбодетандеров 5 и 6 и компрессора 7 с расходом воздуха, равным ГТУ $G_B = 56$ кг/с.

Паспортные данные типовой ГТУ со свободной силовой турбиной

№	Параметр		Установка		
			НК-37СТ	НК-16СТ	НК-12СТ
1	Температура перед турбиной	T_T, K°	1460	1083	998
2	Степень повышения давления в КНД	$\pi_{КНД}$	2,63	2,72	8,8
3	Степень повышения давления в КСД	$\pi_{КСД}$	2,80	—	—
4	Степень повышения давления в КВД	$\pi_{КВД}$	2,85	3,57	—
5	Суммарная степень повышения давления	π_{Σ}	21	9,7	8,8
6	Эффективный КПД	$\eta_e^*, \%$	36	29,0	26,1
7	Расход воздуха	$G_B, \text{кг/с}$	103	105	56
8	Мощность ГТУ	$N_e, \text{МВт}$	25	16,0	6,3

С учетом производительности ТЭЦ, температуры окружающей среды по месяцам года и расхода воздуха через ГТУ G_B была рассчитана располагаемая степень повышения давления в компрессоре 7 (рис. 14).

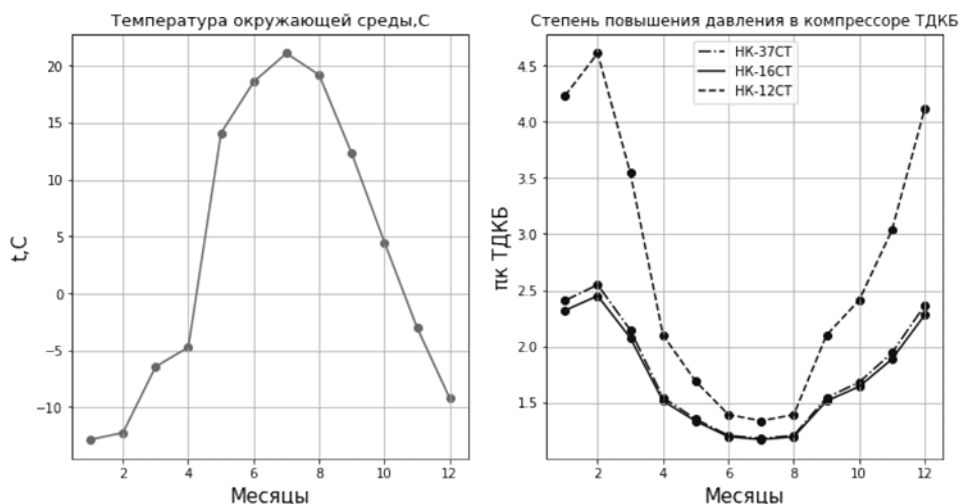


Рис. 14. Климатическая характеристика района ТЭЦ и зависимость степени повышения в компрессоре 7 от расхода топливного газа через ТЭЦ

Степень повышения давления в компрессоре 7 влияет на суммарную степень повышения давления в установках НК-37СТ и НК-16СТ. Наибольшее ее значение достигается на максимальной производительности ТЭЦ и приближается к расчетному значению $\pi_{КНД}$ (см. таблицу). На остальных режимах она меньше, и соответственно снизится суммарная степень повышения давления в ГТУ. Для установки НК-12СТ снижение степени повышения давления в компрессорном блоке 7 компенсируется повышением давления в компрессоре ГТУ.

Для выбранных ГТУ с учетом новой схемы рассчитаны параметры эффективности установок при изменении температуры атмосферного воздуха и расхода топливного газа для ТЭЦ. На рис. 15 приведены графические зависимости из-

менения мощности и КПД турбодетандерных установок относительно их значений для типовых схем, но с учетом тех же атмосферных условий.

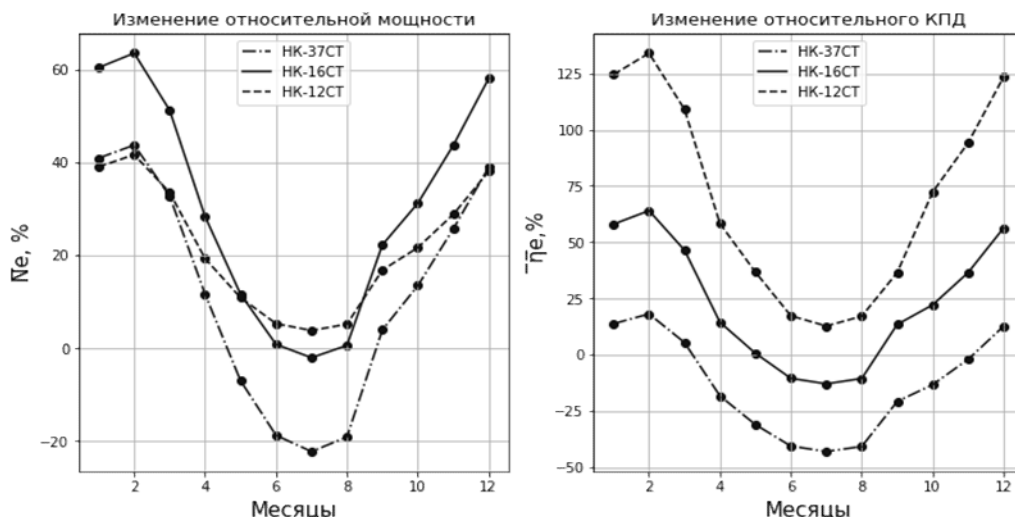


Рис. 15. Изменение относительной мощности и КПД типовых ГТУ в зависимости от расхода топливного газа через ТЭЦ

Для всех установок в летний период снижение расхода топливного газа для ТЭЦ (в сравнении с повышением температуры атмосферного воздуха) является преобладающим фактором снижения КПД и мощности.

Для установки НК-37СТ прирост эффективности наблюдается только в зимний период с наибольшими расходами топливного газа. Увеличения мощности можно достигнуть до 40 %, увеличения КПД – порядка 20 % (эти значения характерны только для заданных параметров ТЭЦ в зимний период). При снижении расхода топливного газа снижается суммарная степень повышения в компрессоре ГТУ и параметры эффективности существенно ухудшаются относительно базовой установки НК-37СТ.

Более плавное изменение параметров на режимах снижения топливного газа ТЭЦ наблюдается у НК-16СТ. В летний период расчетные мощности и КПД незначительно снижаются (порядка 2 %), в зимний период наблюдается существенное улучшение характеристик ГТУ.

По результатам предварительного расчета оснащение установки НК-12СТ турбодетандерным компрессорным блоком увеличивает ее эффективность. Даже на минимальных расходах топливного газа для ТЭЦ в летний период оно позволит увеличить мощность НК-12СТ на 7 % и повысить КПД на 12 %.

В составе комбинированной установки ТЭЦ целесообразно применять типовые ГТУ только при наличии турбодетандерного компрессорного блока. На примере газотурбинной установки НК-12СТ при минимальной тепловой нагрузке ТЭЦ комбинированная газотурбодетандерная энергетическая установка вырабатывает порядка 10 МВт мощности с КПД 30 %, а в зимний период КПД установки увеличивается до 53 %.

Проведенный расчетный анализ показал, что ее электрическая мощность и КПД зависят от величины расхода природного газа, подаваемого на ТЭЦ, по месяцам года и соответствующим им температурам атмосферного воздуха.

Наиболее эффективна комбинированная установка, в которой турбодетандеры связаны с общим валом типовой ГТУ. В качестве типовой ГТУ наиболее эффективна по своим термогазодинамическим параметрам установка НК-12СТ, которая хорошо себя зарекомендовала в эксплуатации на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Установлено, что турбодетандерный компрессорный блок повышает параметры эффективности НК-16СТ, НК-12СТ, которые не соответствуют современным техническим требованиям.

Разработанная тепловая схема КГТДУ может применяться не только для ТЭЦ, она весьма эффективна и для модернизации ГТУ, которые используются в качестве приводов на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стребков А.Н., Осипов А.В., Жывронский С.К.* Термодинамические основы использования детандер-компрессорной ГТУ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2021. № 1. С. 166–181.
2. *Куличихин В.В., Тюняев М.В.* Детандер-генераторные агрегаты в энергетике России. Мифы и реальность // Надежность и безопасность энергетики. 2016. № 4 (35). С. 62–69.
3. *Гулина С.А., Шелудько Л.П.* Моделирование термодинамического цикла ГТД, работающего на газообразном топливе произвольного состава // Сборник трудов XXIX международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 29». Т. 12. Саратов, 2016. С. 67–73.
4. *Гулина С.А.* Газотурбинные установки. Самара: СамГТУ, 2023. 180 с.
5. *Ткаченко В.В., Гириш С.М.* Анализ и обоснование эффективности применения детандер-генераторных агрегатов в энергетических системах // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2019. № 1. С. 82–92.
6. *Юдин Ю.В., Хованский Я.В., Артемьев С.Н.* Совершенствование системы теплоснабжения с применением детандер-генераторных агрегатов // Вестник Удмуртского университета. Серия: Техника и технологии. 2017. № 2. С. 5–10.
7. *Худолей В.И., Кокоткина А.М.* Моделирование и анализ эксплуатационных характеристик детандер-генераторных агрегатов // Научный вестник Чернівецького університету. Механіка, матеріалознавство, інженерне обладнання. 2016. № 795. С. 33–39.
8. *Потехина Н.В., Сорокина О.П., Пашенькин В.И.* Оптимизация параметров работы детандер-генераторных агрегатов для повышения энергоэффективности газотранспортной системы // Промышленная энергетика. 2018. № 6. С. 24–28.
9. *Баранов Г.Г., Шабалина Г.М.* Влияние границ температур на параметры работы детандер-генераторных агрегатов // Теплоэнергетика. 2015. № 12. С. 40–43.
10. *Kiselev S.V., Ryzhenkov D.V.* Analysis of Combined Cycle Power Plant Integration with Expander-Generators for Electric Power Generation // International Journal of Environmental and Science Education. 2021. № 16 (12). Pp. 8576–8588.
11. *Chen H.Yu.C., Zhang C.* Thermodynamic analysis of combined cycle power plant integrated with expander-generator and cooling heat pipe // Applied Thermal Engineering. 2019. № 161. P. 114165.
12. *Sangeetha G., Srinivas T.* Thermodynamic analysis of combined gas turbine and organic Rankine cycle using expander-generator // Materials Today: Proceedings. 2017. № 4(2). Pp. 1080–1090.
13. *Hui S., Min J., Jiandong G., Chao H.* Thermoeconomic optimization and performance analysis of a combined cycle power plant based on an expander-generator // Energy Conversion and Management. 2016. № 108. Pp. 343–355.
14. *Li J., Shu G., Yan J., Li G., Zhou B.* Performance analysis of gas turbine power plants with expander-generator unit // Energy Procedia. 2016. № 8. Pp. 487–492.
15. *Yuan Z., Degelaen P., Lecompte S.* Analysis on the application of a sliding pressure cycle in a combined cycle power plant with an expander-generator // Applied Sciences. 2018. № 8 (6). P. 878.
16. *Bai Z., Lei W., Xie H., Xu Y.* Comparative assessment of working fluids for Organic Rankine Cycles based on combined expander-generator. Energy Sources, Part A: Recovery, Utiliza-

- tion, and Environmental Effects. 2021. № 1.
17. Villanueva F., Ahmadi P., Patterson R., Inger G. Feasibility analysis of combining a Brayton and organic Rankine cycle with an expander-generator in a combined heat and power plant // *Applied Thermal Engineering*. 2019. № 146. Pp. 538–548.
 18. Hongqiang Y., Xinqiang Y. Thermodynamic performance analysis of combined cycle power plant with steam extraction from bottoming cycle // *Energy Conversion and Management*. 2015. № 94. Pp. 1–12.

Статья поступила в редакцию 02 августа 2023 г.

OPTIMIZATION OF COMBINED THERMAL CIRCUITS GAS TURBINE EXPANDER POWER PLANTS

S.A. Gulina, L.P. Sheludko*

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

E-mail: kr_oeg@mail.ru, chel_lp@mail.ru

Abstract. *In this paper, thermal schemes are proposed and the principle of operation of combined power plants of a new type for a thermal power plant is given. Thermodynamic analysis of parameters of thermal circuits of combined power gas turbine expander plants was carried out depending on the outside air temperature, electric and thermal loads of the thermal power plant, as well as the flow rate of natural gas through the gas distribution point consumed by the thermal power plant. Based on the results of the calculation, optimization of the power plant cycle parameters was carried out, providing the specified electric power and efficiency of the gas power turbine. It has been found that its electric power and efficiency depend on the flow rate of natural gas supplied to the thermal power plant in different months of the year and the corresponding air temperatures. The most efficient combined plant is a system in which turbo expanders are connected to the turbo-charger shaft of a typical GTU or complementary to a typical GTU by a turbo expander compressor unit. The use of a new type of combined gas turbine expander power plants seems to be the most effective solution for increasing the generation of electric energy and increasing the thermal efficiency of thermal power plants.*

Keywords: *thermal power station, compressor station gas turbine plant, turbo expander, natural gas, gas distribution point, gas turbine power station.*

REFERENCES

1. Strebkov A.N., Osipov A.V., Zhyvronsky S.K. Termodinamicheskie osnovy ispol'zovaniya detander-kompressornoj GTU [Thermodynamic Bases for Using the Expander Compressor GTU] // Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Ser. Mechanical Engineering. 2021. No. 1. Pp. 166–181. (In Russian).
2. Kulichikhin V.V., Tyunyaev M.V. Consequences of the introduction of expander-generator units into the thermal scheme of the thermal power plant // Heat Supply News. 2017. No. 5 (201).
3. Gulina S.A., Shelud'ko L.P. Modelirovanie termodinamicheskogo cikla GTD, rabotayushchego na gazoobraznom toplive proizvol'nogo sostava [Modeling of the thermodynamic cycle of a gas turbine engine operating on gaseous fuel of arbitrary composition] // Sbornik trudov XXIX mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah MMTT – 29». T. 12. Saratov, 2016. Pp. 67–73. (In Russian).
4. Gulina S.A. Gazoturbinnye ustanovki [Gas turbine units]. Samara: SamGTU, 2023. 180 p. (In Russian).
5. Tkachenko V.V., Girsht S.M. Analiz i obosnovanie effektivnosti primeneniya detander-generatornyh agregatov v energeticheskikh sistemah [Analysis and justification of the effectiveness of using expander-generator units in energy systems] // Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. № 1. Pp. 82–92. (In Russian).
6. Yudin Yu.V., Khovansky Ya.V., Artemyev S.N. Sovershenstvovanie sistemy teplosnab-zheniya s primeneniem detander-generatornyh agregatov [Improvement of the heat supply system using expander-generator units] // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. 2017. № 2. Pp. 5–10. (In Russian).
7. Khudoley V.I., Kokotkin A.M. Modelirovanie i analiz ekspluatatsionnyh harakteristik detander-generatornyh agregatov [Modeling and analysis of operating characteristics of expander-

* Svetlana A. Gulina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Leonid P. Sheludko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

- generator units] // Scientific Bulletin Chernivetskogo universitetu. Mekhanika, materialoznavstvo, inzhenerne possession. 2016. No. 795. Pp. 33–39. (In Russian).
8. *Potekhina N.V., Sorokina O.P., Pashenkin V.I.* Optimizaciya parametrov raboty detander-generatornyh agregatov dlya povysheniya energoeffektivnosti gazotransportnoj sistemy [Optimization of the parameters of operation of the expander-generator units to increase the energy efficiency of the gas transmission system] // Industrial Energy. 2018. No. 6. Pp. 24–28. (In Russian).
 9. *Baranov G.G., Shabalina G.M.* Vliyanie granic temperatur na parametry raboty detander-generatornyh agregatov [Influence of temperature limits on operating parameters of expander-generator units] // Thermal Power Engineering. 2015. No. 12. Pp. 40–43. (In Russian).
 10. *Kiselev S.V., Ryzhenkov D.V.* Analysis of Combined Cycle Power Plant Integration with Expander-Generators for Electric Power Generation // International Journal of Environmental and Science Education. 2021. № 16 (12). Pp. 8576–8588.
 11. *Chen H.Yu.C., Zhang C.* Thermodynamic analysis of combined cycle power plant integrated with expander-generator and cooling heat pipe // Applied Thermal Engineering. 2019. № 161. Pp. 114165.
 12. *Sangeetha G., Srinivas T.* Thermodynamic analysis of combined gas turbine and organic Rankine cycle using expander-generator // Materials Today: Proceedings. 2017. № 4 (2). Pp. 1080–1090.
 13. *Hui S., Min J., Jiandong G., Chao H.* Thermoeconomic optimization and performance analysis of a combined cycle power plant based on an expander-generator // Energy Conversion and Management. 2016. № 108. Pp. 343–355.
 14. *Li J., Shu G., Yan J., Li G., Zhou B.* Performance analysis of gas turbine power plants with expander-generator unit // Energy Procedia. 2016. № 8. Pp. 487–492.
 15. *Yuan Z., Degelaen P., Lecompte S.* Analysis on the application of a sliding pressure cycle in a combined cycle power plant with an expander-generator // Applied Sciences. 2018. № 8 (6). P. 878.
 16. *Bai Z., Lei W., Xie H., Xu Y.* Comparative assessment of working fluids for Organic Rankine Cycles based on combined expander-generator. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2021. № 1.
 17. *Villanueva F., Ahmadi P., Patterson R., Inger G.* Feasibility analysis of combining a Brayton and organic Rankine cycle with an expander-generator in a combined heat and power plant // Applied Thermal Engineering. 2019. № 146. Pp. 538–548.
 18. *Hongqiang Y., Xinqiang Y.* Thermodynamic performance analysis of combined cycle power plant with steam extraction from bottoming cycle // Energy Conversion and Management. 2015. № 94. Pp. 1–12.

УДК 62-932.4

ПРОДУКЦИОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧЕ ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМИ ВОРОТАМИ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА

*И.А. Данилушкин, С.А. Колпащиков, Г.Н. Рогачев**

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

E-mail: idanilushkin@mail.ru, skolpaschikov@mail.ru, grogachev@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача позиционного управления рабочими воротами судоходного шлюза как многомерным объектом управления с сосредоточенными параметрами. Приведена общая постановка задачи, включающая требования к конечному и промежуточным состояниям. При решении задачи предлагается использовать производственную модель регулятора в виде системы правил. Численный метод решения задачи базируется на представлении алгоритма управления в виде априори не фиксируемой и переменной во времени системы правил, определяемых в ходе процесса управления. Представленные результаты численного моделирования подтверждают эффективность предлагаемого метода определения позиционного управления объектами такого вида.

Ключевые слова: рабочие ворота, судоходный шлюз, оптимизация, гибридная система, непрерывно-дискретная система, численный метод, система правил.

Введение

Повсеместное распространение сетевых систем как совокупности подсистем, соединенных физическими или информационными связями, привело к появлению ряда новых задач теории управления. Вопросам анализа и синтеза подобных систем посвящен ряд работ [1–12]. В этих работах также отмечается, что современные системы управления являются гибридными, непрерывно-дискретными. Подсистемы с непрерывными сигналами отражают физические законы функционирования объектов управления, а дискретные подсистемы моделируют работу цифровых управляющих устройств.

Общая схема многомерного нелинейного объекта управления представлена на рис. 1. Поведение непрерывных подсистем – объектов управления (ОУ) с сосредоточенными параметрами – может быть описано векторной системой уравнений вида

$$\dot{X} = F(X, U), \quad Y = \Phi(X). \quad (1)$$

* Иван Александрович Данилушкин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Сергей Александрович Колпащиков, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».

Геннадий Николаевич Рогачев, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

В выражении (1) X – вектор состояний ОУ, U – вектор управляющих воздействий, Y – вектор выходных величин. Выражение (1) является стандартной формой математической модели, представляющей ОУ в пространстве состояний. Вид оператора F определяет динамику ОУ. Оператор Φ определяет измеряемые координаты ОУ и зависит от состава используемых датчиков. Его задание не представляет сложности, за исключением тех случаев, когда состав набора датчиков выясняется в ходе решения задачи проектирования. В большинстве инженерных приложений для решения задач управления сложным объектам используются имитационные модели. Разработка адекватной имитационной модели ОУ является сложной самостоятельной задачей, первым этапом работ по автоматизации технологического процесса [12].

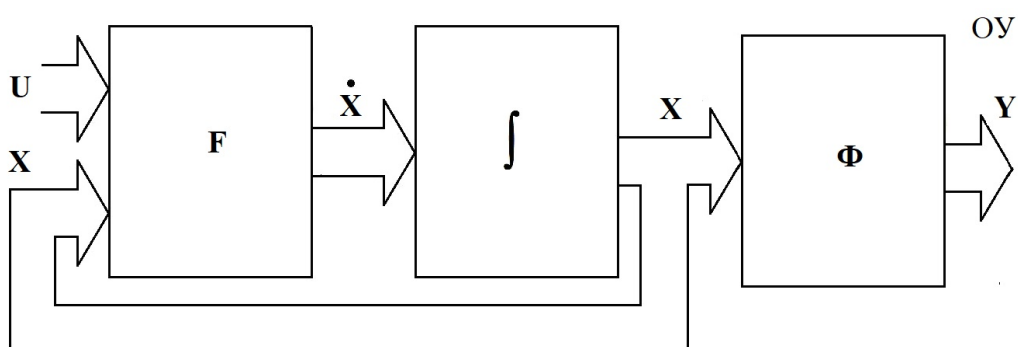


Рис. 1. Общая схема многомерного нелинейного объекта управления

Два основных класса гибридных систем – это системы программного управления и системы позиционного управления [13] (рис. 2, 3).

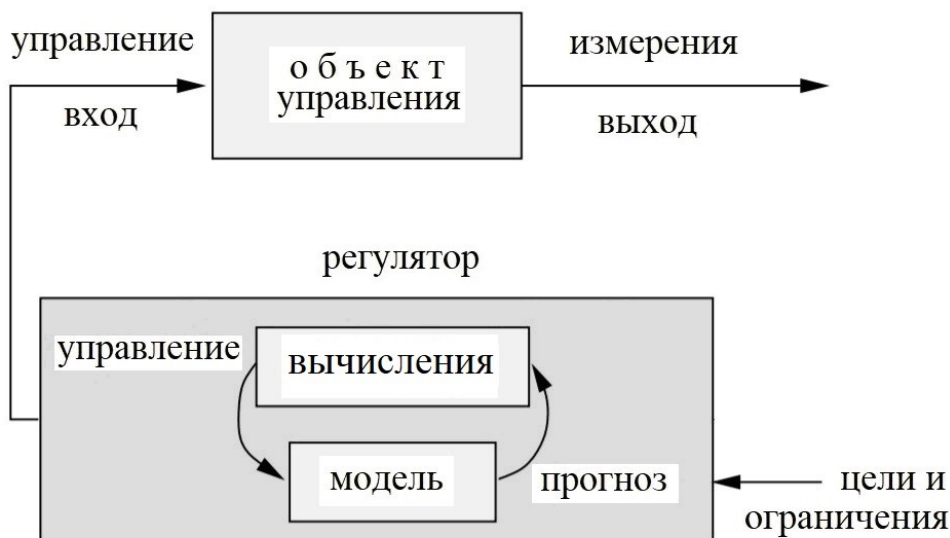


Рис. 2. Система программного управления

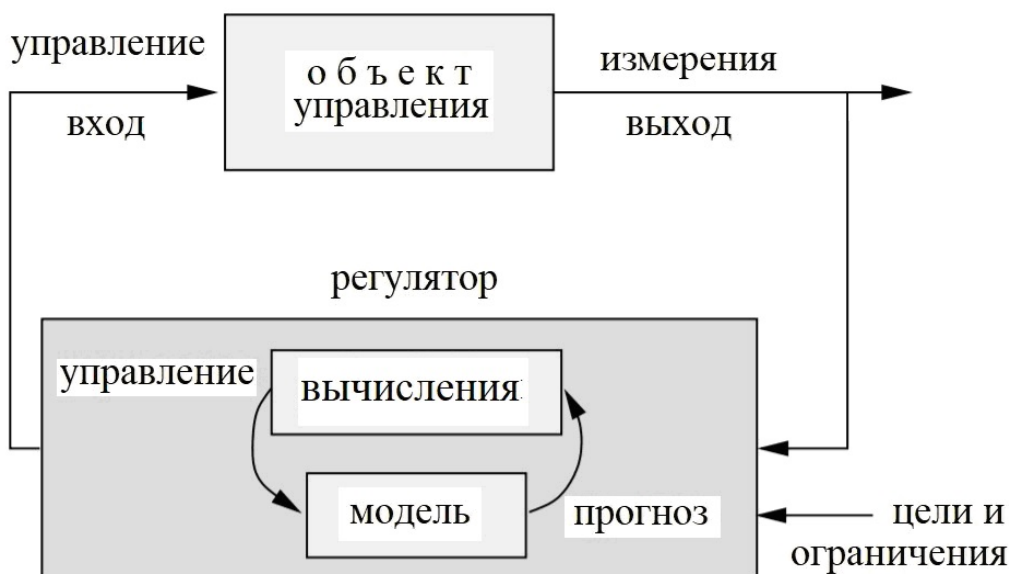


Рис. 3. Система позиционного управления

В силу цифрового характера регулятора управляющие воздействия U являются элементами множества кусочно-постоянных функций с конечным на интервале регулирования числом переключений. В силу непрерывного характера объекта управления (ОУ) переменные состояния X и измеряемые (выходные) переменные Y есть элементы множества непрерывных функций. Алгоритм работы цифрового регулятора системы программного управления состоит в выработке в тактовые моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_{Q-1}$ управляющих сигналов $U(t_0), U(t_1), \dots, U(t_{Q-1})$. Сигнал $U(t_i)$ действует на объект управления вплоть до наступления следующего тактового момента t_{i+1} . Поиск всей совокупности управляющих сигналов $U(\tau)$, $\tau = [t_0, t_Q]$ происходит до начала процесса управления (до момента t_0) или во время процесса управления (в моменты $t_i, i = 0, 1, 2, \dots, Q-1$) исходя из требований к поведению объекта управления с использованием модели объекта и окружающей среды. Алгоритм работы цифрового регулятора системы позиционного управления $U(\tau, Y(\tau))$, $\tau = [t_0, t_Q]$ отличается от алгоритма программного управления лишь тем, что применяемая информация в виде модели объекта и среды дополняется сигналами обратных связей.

Задача управления, таким образом, состоит в определении набора управляющих сигналов $U(\tau)$, $\tau = [t_0, t_Q]$ для программного регулятора или $U(\tau, Y(\tau))$, $\tau = [t_0, t_Q]$ для позиционного регулятора. Применительно к гибридным сетевым системам эта задача оказывается качественно более сложной по сравнению с аналогичными задачами управления непрерывными или дискретными системами ввиду целого ряда принципиальных особенностей гибридных систем, связанных с наличием в них существенным образом взаимодействующих непрерывных и дискретных подсистем, сочетанием непрерывной динамики управляемых процессов с дискретными процедурами получения информации о

параметрах объекта, вычисления по этим данным управляющих воздействий и передачи их на исполнительные устройства. К такого рода особенностям также относят существенное влияние характеристик и свойств информационных каналов и сетевых связей на формирование управляющих алгоритмов; влияние определяющего характера эффекта квантования сигналов по времени и по уровню на качественные показатели систем; влияние на качество систем целого комплекса сильнодействующих специфических возмущающих факторов, таких, в частности, как случайные временные задержки и частичные потери информации при передаче управляющих воздействий. В стандартных промышленных регуляторах (ПИД, lead-lag, линейно-квадратичных) поиск управляющих сигналов, осуществляемый в ходе технологического процесса, происходит по заранее установленной несложной формуле, время вычисления управляющих сигналов мало. Это создает иллюзию непрерывности процесса управления, хотя фактически имеет место многократно повторяющаяся ступенчатая процедура вида «наступление очередного тактового момента времени – вычисление очередного сигнала управления – применение этого управления к объекту вплоть до наступления следующего тактового момента». При использовании нестандартных подходов к синтезу регуляторов систем управления (адаптивные регуляторы, регуляторы с прогнозирующей моделью в контуре и т. п.) время вычисления очередного сигнала управления может быть существенно большим, однако эффектом «запаздывания» при вычислении сигналов управления в темпе с управляемым процессом, как правило, пренебрегают, за исключением случаев, когда принципиальную роль играет ограничение на время принятия управленческих решений. Особенно это касается обладающих признаками сложных систем многомерных технических объектов, управление которыми должно осуществляться в реальном времени.

Постановка задачи

В когнитивной науке, исследующей процессы познания, существует деление знаний на декларативные и императивные [13]. Декларативный (лат. Declarativus – провозглашающий) – содержащий общие положения и заявления без их обоснования и конкретизации. Императивный (лат. imperativus – повелительный) – требующий подчинения, исполнения. Их различие состоит в том, что декларативные знания – это правила связи, а императивные – это правила преобразования. Знание об объекте декларативно, если оно описывает, каков он, а не как его создать (добыть, получить). Эти знания представляют собой утверждения об объектах, их свойствах и отношениях между ними. По сути, это факты из предметной области, фактические знания. Однако знание может быть представлено не только в форме статичных структур (декларативное знание), но и в форме операций (императивное или процедурное знание). Такие знания имеют активную природу. Они определяют представления о средствах и путях как получения новых знаний, так и проверки существующих. Императивные (процедурные) знания описывают правила преобразования объектов предметной области. Это могут быть рецепты, алгоритмы, методики, инструкции, стратегии принятия решений. Примером императивного знания являются системы продукций, т. е. наборы пар типа «условие» – «действие». Если на вход системы продукций попадает одно из «условий», то оно автоматически приводит к соответствующему «действию».

В теории управления традиционно используется один из декларативных способов представления знания об управляющем устройстве. Например,

указывается тип регулятора, описывающее его динамику дифференциальное или разностное уравнение, передаточная функция. Для дискретных линейных систем используют описание с помощью разностных уравнений, z -преобразований, модифицированных z -преобразований. Если регулятор нелинеен, применяют модели в виде нелинейных дифференциальных уравнений с нелинейностью, заданной аналитически или графически. Императивная форма используется довольно редко, в основном в регуляторах, основанных на логике (булевой или нечеткой). Имеющееся разнообразие способов описания регуляторов порождает множество различных методов их анализа и синтеза, единый подход к решению этого круга задач отсутствует. Конструктивным способом преодоления этой проблемы может стать более широкое использование императивного метода описания регуляторов систем управления. В качестве императивной формы задания регулятора выберем систему продукций, набор правил вида «условие – действие». Условная (если, IF) часть каждого правила – антецедент (antecedens – предшествовать) – определяет, когда регулятор должен использовать данное правило. Вторая часть (то, THEN) – консеквент (consequens – последствия) – описывает соответствующее действие.

Императивный подход сводит задачу описания регулятора вне зависимости от его формы к заданию системы продукций как одного или нескольких правил вида «условие – действие». Под условием понимается логическое высказывание. Оно определяет правило перехода регулятора от фазы ожидания к фазе реагирования. В свою очередь, «действие» – правило (алгоритм) вычисления реакции системы управления на стимул и применения (видоизменения) этой реакции в течение следующей фазы ожидания. Такой метод описания регуляторов можно назвать продукционным.

Цель настоящей статьи – демонстрация эффективности процедуры предлагаемого подхода применительно к проблеме синтеза цифрового регулятора для позиционного управления рабочими воротами судоходного шлюза, являющимися многомерным объектом управления с сосредоточенными параметрами. Рассматриваемый метод базируется на представлении алгоритмов управления в виде априори не фиксируемых и переменных во времени систем правил. Метод обеспечивает построение в темпе с управляемым процессом непосредственно на цифровом регуляторе реализующих эти алгоритмы вычислительных процедур, формируемых по информации о свойствах среды с учетом особенностей, обусловленных цифровым характером устройств управления [10, 11].

Описание рабочих ворот судоходного шлюза как объекта управления

Судоходные шлюзы являются неотъемлемой частью инфраструктуры внутренних водных путей России. Стабильность и устойчивость работы этих сооружений напрямую определяет качество работы водного транспорта, нарушения приводят к аварийным ситуациям.

Основное внимание в известных авторам работах уделяется исследованиям гидродинамических процессов в камере судоходного шлюза при гидростатических и гидродинамических нагрузках [14]. В настоящем исследовании рассматривается система управления, призванная предотвратить возможные нарушения синхронности силовых элементов, отвечающих за подъем щита рабочих ворот.

Упрощенная схема системы подъема ворот представлена на рис. 4. Ворота 1 перемещаются по направляющим 2 с помощью подпружиненных тележек 3. Положение «левой» и «правой» сторон ворот может быть представлено координатами

тами L_1 и L_2 . При рассинхронизации работы гидроподъемников возможно образование перекоса ворот, приводящее к их заклиниванию и выходу из строя. По нормативам перекося между сторонами ворот $|L_1 - L_2|$ не должен превышать 60 мм.

Перемещение щита рабочих ворот осуществляется с помощью двух независимых гидроцилиндров 4, установленных по обеим сторонам шлюза. Управление подачей масла в каждый из гидроцилиндров осуществляется маслonaпорными установками 5.

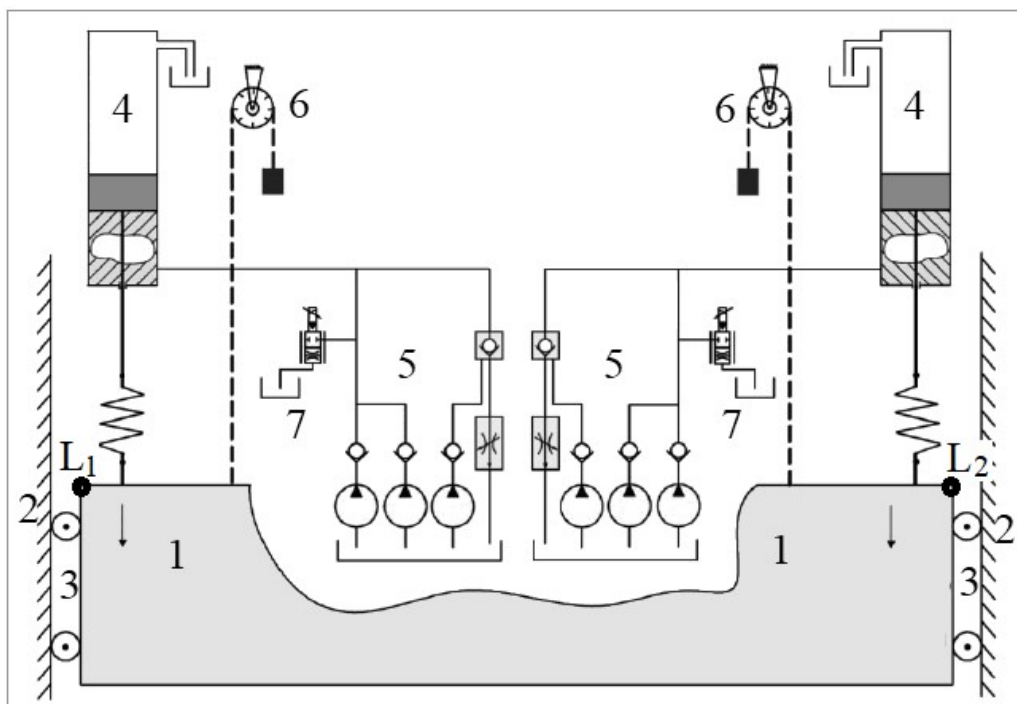


Рис. 4. Упрощенная схема системы подъема ворот

Контроль за положением рабочих ворот происходит с помощью сельсинов 6. В случае возникновения перекоса при подъеме щита рабочих ворот на опережающей стороне открывается золотник синхронизации 7, обеспечивающий сброс давления в гидроцилиндре и снижение скорости подъема опережающей стороны. Аналогичным образом контролируется перекося при опускании щита рабочих ворот.

Математическая модель рабочих ворот как объекта управления в пространстве состояний представлена системой

$$\begin{aligned} m\ddot{L} + a_1\dot{L} + a_2L + a_3\dot{\theta} + a_4\theta &= u_1 + u_2, \\ \Psi\ddot{\theta} + b_1\dot{L} + b_2L + b_3\dot{\theta} + b_4\theta &= k_1u_1 + k_2u_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\ddot{L}, \dot{L}, L$ – ускорение, скорость и положение центра тяжести рабочих ворот; $\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta$ – угловое ускорение, угловая скорость и угол наклона рабочих ворот; m и Ψ – их масса и момент инерции; $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4, k_1, k_2$ – параметры, зависящие от геометрии ворот и распределения массы по объему. Действующая на ворота подъемная сила может быть условно разделена на две составляющие u_1

и u_2 , приложенные к «левой» и «правой» сторонам ворот. Положения «левой» и «правой» сторон ворот (координаты L_1 и L_2) могут быть вычислены по формулам $L_1 = L + l \sin \theta / 2$ и $L_2 = L - l \sin \theta / 2$, где l – длина ворот. Интересующая нас величина перекоса ворот может быть вычислена по формуле $|L_1 - L_2| = l \sin \theta$. Причина возникновения перекоса – в отличии величин, составляющих управление переменных u_1 и u_2 , что может быть вызвано физическим износом гидropодъемников или действием каких-либо возмущений.

Системные связи рабочих ворот как объекта управления в пространстве состояний представлены на рис. 5. Требования к поведению объекта управления состоят в поддержании перекоса между сторонами ворот $|L_1 - L_2| < 60$ мм на протяжении всего времени регулирования.

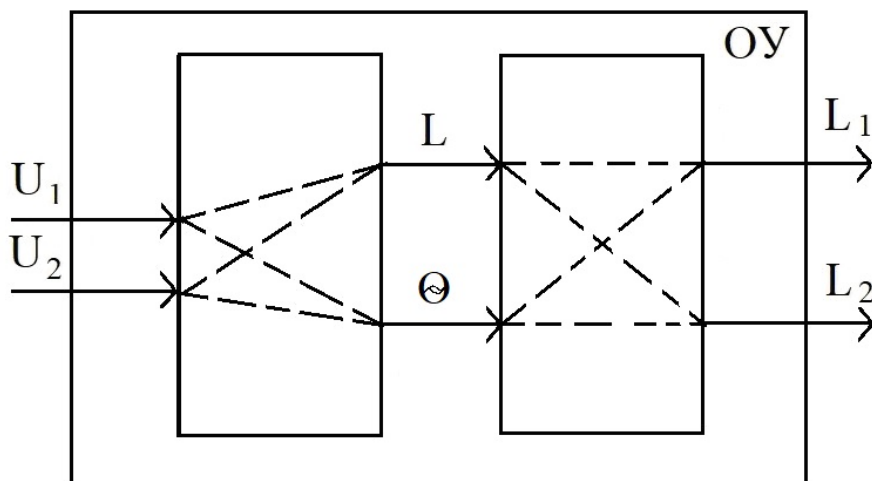


Рис. 5. Системные связи объекта управления «рабочие ворота»

Описание процедуры синтеза продукционного регулятора системы управления

В работе рассмотрена задача позиционного управления подъемом рабочих ворот судоходного шлюза как многомерного объекта управления с сосредоточенными параметрами.

Проблема синтеза системы продукций регулятора – это задача определения алгоритма работы цифрового позиционного регулятора как набора управляющих сигналов (в общем случае векторных) $U(t_i, Y(t_i))$, $i = 0, 1, \dots, Q-1$, действующих на объект управления на временных интервалах $[t_i, t_{i+1})$ от момента t_0 начала процесса до момента t_Q его окончания. Начальные условия имеют вид $L_{1,2}(t_0) = 0$. Окончание процесса определяется условием $L_{1,2}(t_Q) = 10$ м. Алгоритм должен обеспечивать требование $|L_1 - L_2| \leq 0.06$ м на протяжении всего процесса.

Система правил работы цифрового позиционного регулятора на каждом временном шаге задается следующим образом: «если $\max(L_1, L_2) < 10$ м и $|L_1 - L_2| \leq 0.06$ м, то $u_1(t) = u_{\max}$, $u_2(t) = u_{\max}$ », «если $\max(L_1, L_2) < 10$ м

и $L_1 - L_2 > 0.06$ м, то $u_1(t) = 2 \cdot (L_1 - L_2), u_2(t) = u_{\max}$ », «если $\max(L_1, L_2) < 10$ м и $\max(L_1, L_2) < 10$ м и $L_2 - L_1 > 0.06$ м, то $u_1(t) = u_{\max}, u_2(t) = 2 \cdot (L_2 - L_1)$ », «если $L_1 \geq 10$ м и $L_2 < 10$ м, то $u_1(t) = 0, u_2(t) = u_{\max}$ », «если $L_2 \geq 10$ м и $L_1 < 10$ м, то $u_2(t) = 0, u_1(t) = u_{\max}$ », «если $L_2 \geq 10$ м и $L_1 \geq 10$ м, то $u_1(t) = 0, u_2(t) = 0$ », $t \in [t_i, t_{i+1})$, $i = 0, 1, \dots, Q-1$.

Использование такого способа позволяет скорректировать управление в случаях отклонения траектории процесса от желаемой вследствие неточности модели или воздействия возмущающих факторов. Однако вычисление сигнала управления происходит в тактовые моменты времени не мгновенно, возникает определенное временное запаздывание. При значительной сложности вычислений этот факт должен быть принят во внимание.

Осуществить верификацию разработанной позиционной системы управления можно с применением набора блоков Stateflow программного комплекса MATLAB-Simulink. Модель разработанной системы управления представлена на рис. 6, 7. Графики перекоса ворот в системе при различном характере возмущающих воздействий показаны на рис. 8, 9.

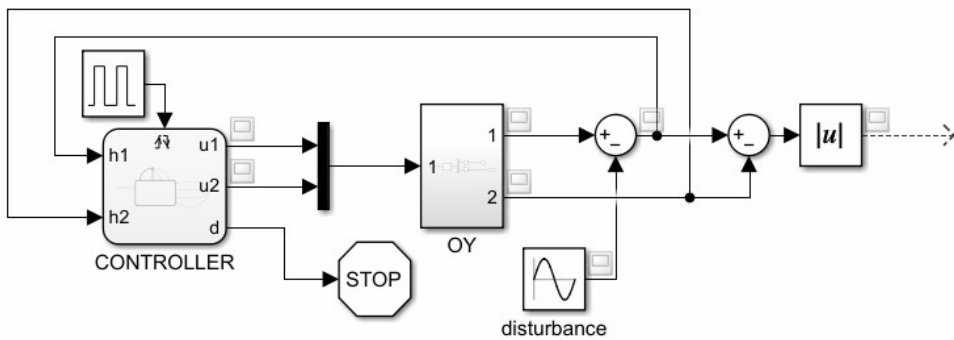


Рис. 6. Simulink-модель системы управления

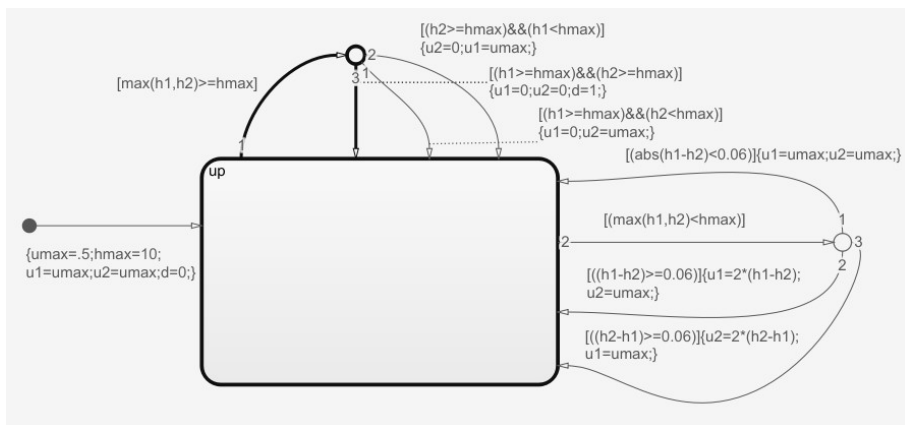


Рис. 7. Stateflow-диаграмма регулятора

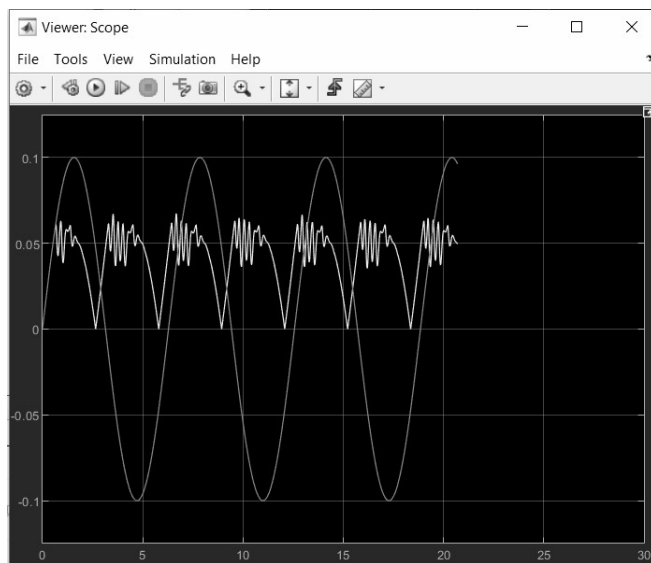


Рис. 8. Графики возмущающего воздействия и вызванного им перекоса ворот, синусоидальное воздействие амплитудой 0.1 м

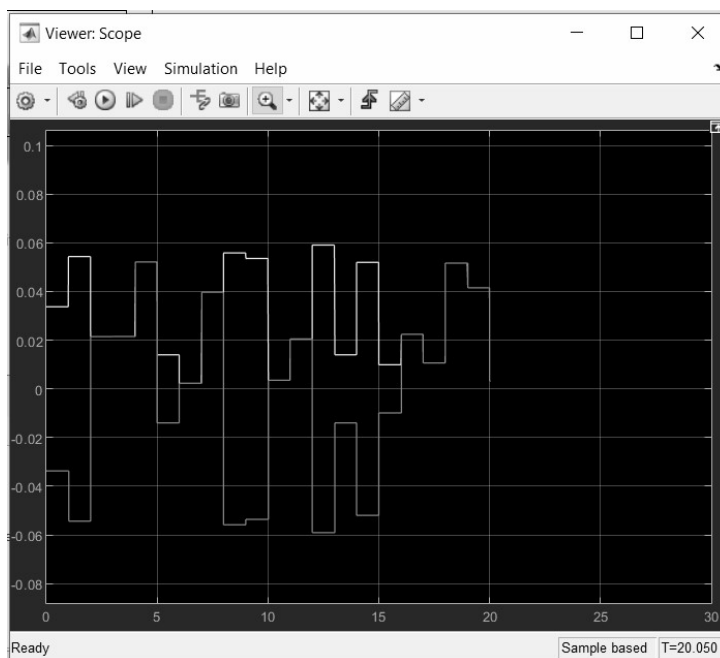


Рис. 9. Графики возмущающего воздействия и вызванного им перекоса ворот, воздействие генератора равномерно распределенных в диапазоне ± 0.06 м случайных чисел

Закключение

Рассмотрена задача позиционного управления рабочими воротами судоходного шлюза как многомерным объектом с сосредоточенными параметрами. Формулировка задачи и требования к конечному и промежуточным состояниям учи-

тывают весь комплекс технологических требований. В качестве ресурсов управления используются два канала управления с несколькими вариантами воздействия по каждому из каналов. Для получения информации о ходе технологического процесса, применяемой в расчетах управляющих воздействий, используются показания датчиков положения, размещенных в характерных точках рабочих ворот. На каждом временном шаге срабатывания регулятора управляющий сигнал зависит от координат L_1 , L_2 объекта управления и корректируется по мере нарушения технологических требований. Представлены результаты численного моделирования, подтверждающие эффективность предлагаемого подхода. Численный метод решения задачи базируется на представлении алгоритма управления в виде априори не фиксируемой и переменной во времени системы правил, определяемых в ходе технологического процесса. Дальнейшее исследование будет посвящено анализу качества работы системы управления в условиях неопределенностей, связанных с неточностью модели объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карнов Ю.Г., Парийская Е.Ю. Качественный анализ гибридных систем // Труды СПбПУ. Вычислительные, измерительные и управляющие системы. СПб, 1994. № 499. С. 16–20.
2. Wong W.S., Brockett R.W. Systems with Finite Communication Bandwidth Constraints—II: Stabilization with Limited Information Feedback // IEEE Transactions on Automatic Control. 1999. Vol. 44 (5). Pp. 1049–1053.
3. Polderman J.W., Willems C. Introduction to Mathematical Systems Theory: A Behavioral Approach. Texts in Applied Mathematics. Vol. 26. New York: Springer-Verlag, 1998. 424 p.
4. Seiler P., Sengupta R. An H_∞ Approach to Networked Control // Transactions on Automatic Control. 2005. Vol. 50 (3). Pp. 356–364.
5. Hespanha J., Naghshtabrizi P., Xu Y. A Survey of Recent Results in Networked Control Systems // Proc. of IEEE Special Issue on Technology of Networked Control Systems. 2007. Vol. 95 (1). Pp. 138–162.
6. Hespanha J.P., Ortega A., Vasudevan L. Towards the Control of Linear Systems with Minimum Bit-rate // Int. Symp. on the Mathematical Theory of Networks and Systems. 2002. Pp. 1–15.
7. Elia N., Mitter S.K. Stabilization of Linear Systems with Limited Information // IEEE Transactions on Automatic Control. 2001. Vol. 46 (9). Pp. 1384–1400.
8. Tatikonda S., Mitter S. Control Under Communication Constraints // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Vol. 49 (7). Pp. 1056–1068.
9. Caspi P., Maler O. From Control Loops to Real-Time Programs // Handbook of Networked and Embedded Control Systems. Basel: Birkhauser, 2008. Pp. 395–418.
10. Montestruque L.A., Antsaklis P.J. State and Output Feedback Control in Model-based Networked Control Systems // Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. 2002. Vol. 4. Pp. 1620–1625.
11. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. СПб: БХВ-Петербург, 2006. 224 с.
12. Branicky M.S., Liberatore V., Phillips S.M. Networked Control System Co-Simulation for Co-Design // Proceedings of the 2003 American Control Conference. 2003. Vol. 4. Pp. 3341–3346.
13. Рогачев Г.Н. Продукционный метод описания, анализа и синтеза автоматических регуляторов непрерывно-дискретных систем управления // Cloud of Science. 2014. Т. 1. № 1. С. 17–40.
14. Мельников Е., Данилушкин И., Колтациков С., Морозов В., Краснощёков И. Система управления верхними рабочими воротами судоходного шлюза // Современные технологии автоматизации. 2014. № 2. С. 66–71.

Статья поступила в редакцию 21 августа 2023 г.

FEEDBACK CONTROL OF OPERATING GATES OF A SHIPPING LOCK USING A SYSTEM OF RULES

*I.A. Danilushkin, S.A. Kolpashchikov, G.N. Rogachev**

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

E-mail: idanilushkin@mail.ru, skolpaschikov@mail.ru, grogachev@mail.ru

Abstract. *The problem of positional control of the working gates of a shipping lock as a multidimensional control object with lumped parameters is considered. A general formulation of the problem is given, including requirements for the final and intermediate states. When solving the problem, it is proposed to use a productive model of the regulator in the form of a system of rules. The numerical method for solving the problem is based on representing the control algorithm in the form of an a priori non-fixed and time-varying system of rules determined during the control process. The presented results of numerical modeling confirm the effectiveness of the proposed method for determining the positional control of objects of this type.*

Keywords: *working gates, shipping lock, optimization, hybrid system, continuous-discrete system, numerical method, system of rules.*

REFERENCES

1. *Karpov Yu.G., Pariyskaya E.Yu.* Kachestvennyj analiz gibridnyh sistem [Qualitative analysis of hybrid systems] // Proceedings of St. Petersburg State University. Computing, measuring and control systems. St. Petersburg, 1994. No. 449. Pp. 16–20. (In Russian).
2. *Wong W.S., Brockett R.W.* Systems with Finite Communication Bandwidth Constraints–II: Stabilization with Limited Information Feedback // IEEE Transactions on Automatic Control. 1999. Vol. 44 (5). Pp. 1049–1053.
3. *Polderman J.W., Willems C.* Introduction to Mathematical Systems Theory: A Behavioral Approach. Texts in Applied Mathematics. Vol. 26. New York: Springer-Verlag, 1998. 424 p.
4. *Seiler P., Sengupta R.* An H_∞ Approach to Networked Control // Transactions on Automatic Control. 2005. Vol. 50 (3). Pp. 356–364.
5. *Hespanha J., Naghshtabrizi P., Xu Y.* A Survey of Recent Results in Networked Control Systems // Proc. of IEEE Special Issue on Technology of Networked Control Systems. 2007. Vol. 95 (1). Pp. 138–162.
6. *Hespanha J.P., Ortega A., Vasudevan L.* Towards the Control of Linear Systems with Minimum Bit-rate // Int. Symp. on the Mathematical Theory of Networks and Systems. 2002. Pp. 1–15.
7. *Elia N., Mitter S.K.* Stabilization of Linear Systems with Limited Information // IEEE Transactions on Automatic Control. 2001. Vol. 46 (9). Pp. 1384–1400.
8. *Tatikonda S., Mitter S.* Control Under Communication Constraints // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Vol. 49 (7). Pp. 1056–1068.
9. *Caspi P., Maler O.* From Control Loops to Real-Time Programs // Handbook of Networked and Embedded Control Systems. Basel: Birkhauser, 2008. Pp. 395–418.
10. *Montestruque L.A., Antsaklis P.J.* State and Output Feedback Control in Model-based Networked Control Systems // Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. 2002. Vol. 4. Pp. 1620–1625.
11. *Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B.* Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy [Systems modeling. Dynamic and hybrid systems]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2006. 224 p. (In Russian).

* *Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Sergey A. Kolpashchikov (Ph.D. (Techn.)), Head of Department.
Gennadiy N. Rogachev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

12. *Branicky M.S., Liberatore V., Phillips S.M.* Networked Control System Co-Simulation for Co-Design // Proceedings of the 2003 American Control Conference. 2003. Vol. 4. Pp. 3341–3346.
13. *Rogachev G.N.* Produkcionnyj metod opisaniya, analiza i sinteza avtomaticheskikh regulyatorov nepreryvno-diskretnykh sistem upravleniya [Productive method of description, analysis and synthesis of automatic controllers of continuous-discrete control systems] // Cloud of Science. 2014. Vol. 1. No. 1. Pp. 17–40. (In Russian).
14. *Melnikov E., Danilushkin I., Kolpashchikov S., Morozov V., Krasnoshchekov I.* Sistema upravleniya verhnimi rabochimi vorotami sudohodnogo shlyuza [Control system for the upper working gates of a shipping lock] // Modern automation technologies. 2014. No. 2. P. 66–71. (In Russian).

УДК 004.942

СИСТЕМА ТЕЛЕМАТИКИ И ДИАГНОСТИКИ АВТОНОМНОГО ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

С.П. Орлов, Е.А. Косарева *

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

E-mail: orlovsp1946@gmail.com, katena_kosareva@inbox.ru

Аннотация. Рассматривается задача управления эксплуатацией и техническим обслуживанием автономных грузовых автомобилей КАМАЗ с помощью системы телематики и диагностики. Описаны функции и состав бортового модуля контроля роботизированного автомобиля. Наличие развитой системы мониторинга состояния агрегатов и узлов обеспечивает решение задачи управления режимами эксплуатации. Разработана и реализована структура системы телематики и диагностики. Показаны основные блоки предлагаемой системы. Основные функции по диагностике и прогнозированию выполняются на рабочей станции с аналитическим модулем. Предложено использовать подход, основанный на анализе матриц предотказных состояний агрегатов. Приведен пример анализа матриц для системы охлаждения двигателя автомобиля. Проведено моделирование системы охлаждения двигателя и получены графики переходных процессов. Аналитический модуль построен с использованием искусственных нейронных сетей для анализа временных рядов значений параметров автомобиля. Для проведения виртуальных испытаний автомобиля в различных режимах эксплуатации разработана имитационная модель на стохастической временной раскрашенной сети Петри. Модель имитирует как движение автомобиля к точке выполнения производственных операций, так и изменение технического состояния автомобиля. Имитационная модель позволяет описывать и исследовать влияние случайных факторов на время выполнения производственных заданий, учитывать вероятностные характеристики событий отказов или появления дефектов в узлах и агрегатах автомобилей. Применение искусственной нейронной сети в аналитическом модуле рабочей станции системы диагностирования дает возможность осуществлять прогнозирование технического состояния узлов и систем автомобилей в режиме реального времени с последующей верификацией динамики процессов на имитационной модели на сети Петри. К основным новым научным результатам, полученных авторами, относятся структура рабочей станции с аналитическим модулем и имитационная модель на сети Петри для анализа и прогноза технического состояния автомобиля.

Ключевые слова: автономные автомобили, диагностика, транспортная телематика, матрицы предотказных состояний, искусственные нейронные сети, имитационные модели на сетях Петри.

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

Екатерина Алексеевна Косарева, аспирант кафедры «Вычислительная техника».

Введение

Обеспечение высокого уровня работоспособности и надежности автономных транспортных средств требует постоянного мониторинга их технического состояния, контроля механических и электронных элементов. Единый анализ этих данных при возникновении скрытых неисправностей позволяет вовремя предотвратить ошибки, сбои в электронных и механических блоках транспортного средства.

В статье рассмотрены вопросы организации системы телематики и диагностирования технического состояния автономных автомобилей. Исследования проводились в рамках проекта ФЦП РФ по созданию роботизированных автомобилей КАМАЗ агротехнического назначения [1–3]. В пп. 1 и 2 приводятся общие сведения об организации управления, мониторинга и контроля технического состояния системы беспилотных грузовых автомобилей КАМАЗ для сельскохозяйственных работ. В п. 3 описывается разработанная авторами рабочая станция с аналитическим модулем в составе системы диагностики.

1. Бортовая система контроля автомобиля

Современные автомобили оснащены большим числом измерительных устройств и средствами передачи данных на следующий уровень иерархии управления. Для организации процессов сбора, накопления и анализа эксплуатационных данных необходимо использовать специализированное программное обеспечение [4].

Первичная обработка и хранение данных включают в себя первоначальную обработку технических и эксплуатационных параметров автомобиля, которые контролируются бортовой системой транспортного средства. Первичная обработка нацелена на упорядочивание данных с помощью кластеризации и оптимизации. Для считывания накопленной информации о неисправностях и дефектах элементов автомобиля необходимо реализовать структуру хранения и обработки информации. Такая структура представлена в виде программно-аппаратного комплекса, который включает в себя сервер хранения данных и систему управления базой данных СУБД [1].

Разработанная бортовая система контроля включает в себя блоки сбора и передачи информации, предназначенные для оповещения водителя или оператора о поломках, нарушениях работы устройств автомобиля или повреждении его основных функциональных компонентов.

Преимущество данной системы контроля состоит в том, что во время управления автомобилем имеется возможность проверить в реальном времени основные параметры транспортного средства и определить возможные проблемы в случае выхода из строя агрегатов.

На рис. 1 представлена схема, описывающая информационные потоки в бортовом модуле.

Бортовая система связи при помощи средств связи Wi-Fi, Bluetooth, GPRS и шины CAN отправляет накопленную информацию об устройствах автомобиля на блок управления. Переданная информация используется для достоверной оценки работоспособности и безопасности автомобиля, его отдельных узлов, а также позволяет спрогнозировать его незапланированное техническое обслуживание.



Рис. 1. Передача данных в бортовой системе контроля роботизированного автомобиля КАМАЗ

Разработка и внедрение бортового модуля (контроллера) увеличивает эксплуатационную готовность и надежность автомобилей, позволяет выявить предотказные состояния для контролируемых узлов и агрегатов автомобиля и сокращает издержки, связанные с внезапными отказами и авариями на маршруте.

2. Телематика и диагностика

Система связи автономных транспортных средств функционирует в едином информационном пространстве, где происходит обмен и передача данных между автомобилями и диспетчерским пунктом. Дистанционный мониторинг и манипулирование информационными данными и устройствами автомобиля основывается на телематике технического состояния автомобиля.

На рис. 2 изображена структурная схема телематики и диагностики для роботизированного автомобиля.

В автомобиль устанавливаются устройства слежения за параметрами агрегатов и необходимое оборудование. С помощью телематических данных фиксируются местоположение, время простоя, расход топлива, поломки автомобиля и многое другое. При анализе конкретных событий и шаблонов эти сведения используются для подробной информации обо всем парке.

С помощью данных средств автоматизации можно повысить продуктивность технического средства за счет:

- увеличения времени полезного использования техники;
- оптимизации маршрутов и транспортных задач;
- управления парком автомобилей в режиме реального времени;
- снижения затрат на обслуживание и ремонт техники;
- минимизации рисков возникновения незапланированных простоев из-за поломок и ДТП.



Рис. 2. Структурная схема системы телематики и диагностики

3. Рабочая станция с аналитическим модулем

Для прогнозирования отказов и выявления технического состояния автомобиля авторами была разработана рабочая станция с аналитическим модулем (на рис. 2 выделена жирной рамкой). В процессе разработки аналитического модуля были использованы следующие методики:

- применение матриц предотказных состояний;
- прогнозирование технических состояний на основе искусственных нейронных сетей;
- имитационное моделирование процессов отказов узлов и агрегатов.

Наличие большого объема данных о технических и эксплуатационных параметрах автомобиля, а также внешних проявлениях отказов или деградационных изменениях в узлах и агрегатах автомобиля требует повышения качества мониторинга и использования глубокого анализа информации о транспортном средстве.

Матрицы предотказных состояний. Современные системы диагностики технического состояния грузовых автомобилей основаны на стандартах ISO 22901-1 (ODX) и ISO 13209 (OTX). Одной из основных целей стандарта ISO 22901-1 (ODX) является реализация эффективного взаимодействия на всех стадиях жизненного цикла автомобиля между всеми участниками этого цикла (производителями автомобилей, сервисными организациями, производителями элек-

тронных систем). В большинстве случаев основным фактором, влияющим на решение о проведении технического обслуживания и ремонтных мероприятий, являются данные производителя автомобиля о нормативных сроках и пробеге. На основе этих данных даются рекомендации проводить те или иные мероприятия обслуживания или ремонта. Обычно такие рекомендации базируются на статистике работы узлов и агрегатов, а также на результатах стендовых или натурных испытаний в нормальных условиях эксплуатации.

На практике нормативный пробег и срок службы автомобилей могут быть изменены в зависимости от условий эксплуатации, стиля вождения, нагрузок на автомобиль, общего срока службы и времени наработки агрегата или сборки, метеорологических и климатических условий, условий эксплуатации, а также видов и разновидностей дорожных покрытий, преодолеваемых в процессе эксплуатации. Такие решения могут быть приняты только на основе экспертной оценки или опыта эксплуатации таких транспортных средств в сопоставимых условиях. При этом зачастую решения о проведении ремонта принимаются даже при внешних проявлениях перед отказами или деградиационными изменениями в узлах и агрегатах (неустойчивое функционирование, динамические отклонения параметров вектора состояния в ответ на управляющие и возмущающие воздействия, шум, вибрацию).

В данной статье рассматривается пример использования матрицы предотказных состояний для анализа системы охлаждения двигателя. Наиболее существенными неисправностями (помимо легко диагностируемого снижения уровня антифриза) являются:

- отказ системы водяного насоса;
- выход из строя термостата;
- выход из строя муфты вентилятора.

При разработке роботизированного автомобиля КАМАЗ на шасси 65119 рассматривались следующие условия в соответствии с нормами «Классификация условий эксплуатации автомобилей» [5]: категория V – автомобильные дороги местного назначения, за пределами пригородной зоны (более 50 км от границы города); дорожное покрытие Д6; типы рельефа – Р1 (равнинный) и Р2 (слабохолмистый).

Для составления матрицы предотказных состояний необходимо определить показатели наработки на отказ, установленные производителями элементов. Далее выявить факторы, которые влияют на износ элементов, используя при этом значения параметров коэффициента сложности операций при эксплуатации в соответствии с экспертной оценкой (первоначальная оценка при первоначальной настройке системы мониторинга и прогнозирования системы) [6].

На примере системы охлаждения двигателя рассмотрим данные экспертных оценок [6], которые приведены в табл. 1 и табл. 2. Под термином «коэффициент сложности операции» понимается количественная оценка влияния условий эксплуатации на надежность элементов системы, которая определяется группой экспертов.

При оценке коэффициентов сложности операций были использованы стандартные значения основных параметров элементов системы охлаждения, приведенные в табл. 1. Полученные экспертные оценки показаны в табл. 2.

В табл. 3 в качестве примера приведены экспертные оценки предельных отклонений параметров двух переходных процессов в системе охлаждения автомобиля, характеризующие предотказные состояния элементов.

Таблица 1

Значения основных параметров элементов системы охлаждения

Элемент системы охлаждения	Эксплуатационный параметр		
	Стандартный пробег до отказа, тыс. км	Стандартное время работы до отказа, тыс. часов	Стандартное количество рабочих циклов до отказа, тыс. единиц
Водяной насос	120	25	–
Термостат	120	30	–
Муфта вентилятора	–	–	10

Таблица 2

Значения коэффициентов сложности операции (экспертная оценка)

Фактор	Коэффициент сложности операции для элемента системы охлаждения		
	Водяной насос	Термостат	Муфта вентилятора
Низкая частота вращения коленчатого вала	1,17	1	1,03
Работа при низких температурах	1,05	1,03	1,06
Работа при высоких температурах	1	1,09	1,12
Эксплуатация в запыленных / засоленных условиях	1,08	1,11	1,22
Работа при низком атмосферном давлении	1	1,07	1

Для наглядности был проведен анализ диагностики термостата на основе первичных данных, полученных в рамках моделирования систем двигателя шасси КАМАЗ.

Табл. 1–3 используются при построении матриц предотказных состояний элементов системы охлаждения агрегатов автомобиля КАМАЗ. Размер матриц предотказных состояний в целом очень большой, и они не приводятся в данной статье из-за ограниченности объема публикации. Матрицы предотказных состояний, построенные с привлечением экспертов, далее используются для разметки обучающих датасетов диагностических нейронных сетей.

Был проведен анализ возможности диагностики термостата на основе первичных данных, полученных в рамках моделирования систем двигателя шасси КАМАЗ. На рис. 3, а показано нормальное функционирование системы охлаждения для режима «прогрев без движения». На рис. 3, б и рис. 3, в приведены графики температуры охлаждающей жидкости (антифриза) при нештатных ситуациях.

Для исследования была взята фактическая характеристика прогрева двигателя Cummins, установленного на автомобилях КАМАЗ различных модификаций. Вид переходного процесса рис. 3, а показывает, что данный объект управления может быть описан как апериодическое звено. На этом двигателе термостат представляет собой релейный контроллер, нижним пределом регулирования которого является температура 70 °С (температура термостата для открытия анти-

фриза в «большом круге охлаждения»), а верхним пределом является температура 107 °С, при которой включается вентилятор, чтобы заставить антифриз остыть до достижения температуры 85–87 °С. Основными неисправностями термостата являются: а) заклинивание термостата (в открытом и закрытом состоянии); б) ухудшение свойств антифриза. На основе этого были смоделированы типичные условия работы термостата до выхода из строя, включая:

- частичное открытие термостата на начальной фазе прогрева двигателя;
- критическое ухудшение свойств антифриза при измерении температуры;
- неправильное срабатывание клапана, открывающего «большой» круг охлаждения.

Таблица 3

**Матрица отклонений параметров переходных процессов
для идентификации предотказных состояний элементов системы
охлаждения**

Характеристики системного процесса	Системный процесс в агрегате или элементе	
	Повышение температуры двигателя во время прогрева	Снижение температуры масла в коробке передач при охлаждении
Цель управления	Ограничение температуры двигателя	Ограничение температуры масла
Управляемый параметр	Температура двигателя	Температура масла
Возмущающие воздействия	Температура, давление и влажность воздуха в окружающей среде, давление топлива	Температура, давление и влажность воздуха в окружающей среде, давление топлива, температура охлаждающей жидкости
Тип переходного процесса	Апериодический	Колебательный
Ошибка при достижении целевого значения управляемого параметра, заданного для нормального функционирования, %	±20	±8
Изменение длительности переходного процесса, с	120	10
Изменение показателя колебательности, %	0	13

Предположим, имеется автомобиль КАМАЗ с пробегом 90 тыс. км, эксплуатируемый на сельскохозяйственном предприятии на юге Российской Федерации, при этом наработка во времени составила 24 тыс. часов (количество циклов эксплуатации неизвестно, поскольку оно подсчитывается без использования специальных программных и аппаратных средств мониторинга). Тогда для термостата основными факторами износа являются эксплуатация в условиях высоких температур и эксплуатация в условиях запыленности. Используя значения коэффициентов сложности операций эксплуатации, приведенные в табл. 2, получаем, что фактическое время наработки в виде пробега составляет около 110 тыс. км,

а в пересчете на время наработки имеем более 29 тыс. часов, что почти соответствует стандартному пробегу до начала эксплуатации.

В этих условиях следует использовать специальные средства для контроля температуры охлаждающей жидкости во время нагрева, чтобы составить динамическую характеристику и сравнить ее с модельными характеристиками, соответствующими условиям до отказа (например, как показано на рис. 3). Моделирование проводилось в программной среде LMS Imagine.Lab AMESim фирмы Siemens, в которой существует множество различных математических моделей двигателя и других агрегатов грузовых автомобилей.

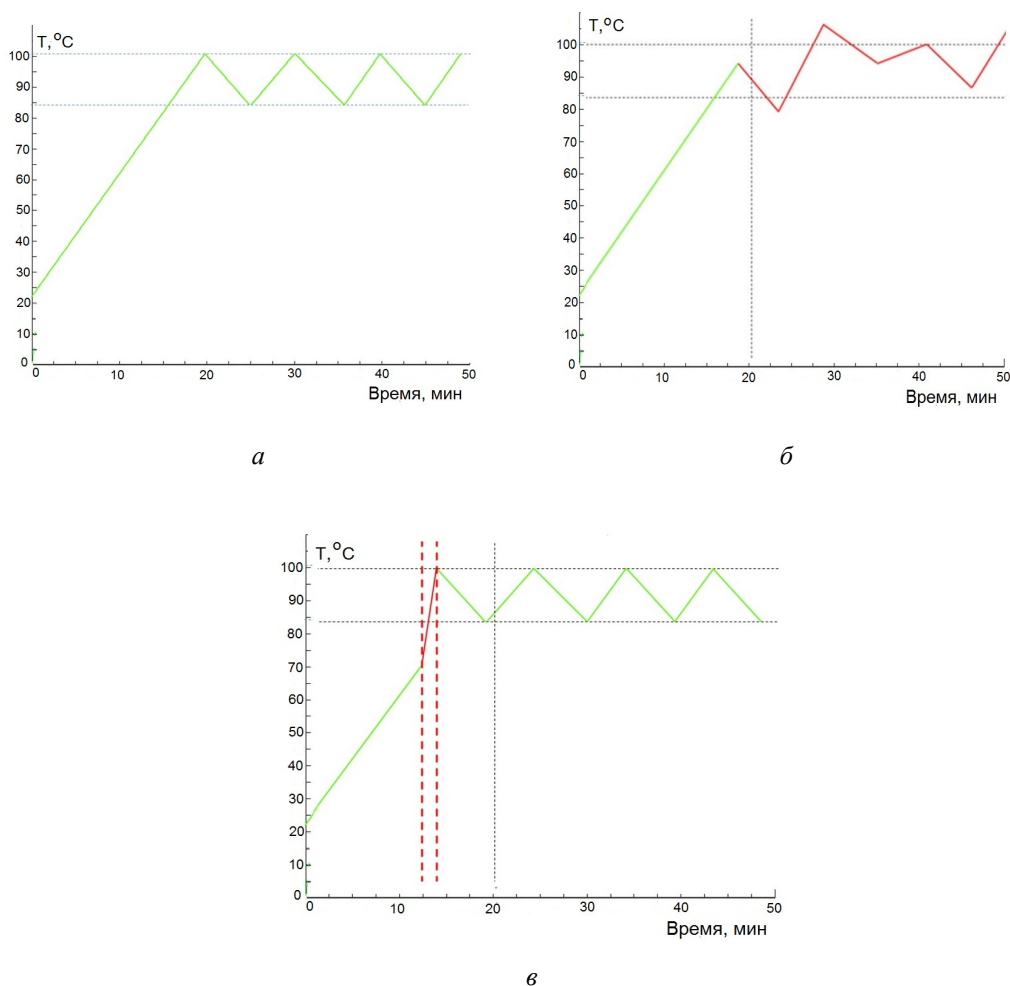


Рис. 3. Моделирование переходных режимов системы охлаждения при температуре внешней среды в диапазоне от +15 до +25 °С:

а – нормальное функционирование системы охлаждения; *б* – режим работы в случае ухудшения свойства антифриза; *в* – режим работы при неправильной работе клапана при измерении температуры

При подтверждении соответствия процесса перехода одному из шаблонов для условий, предшествующих отказу, следует принять меры по замене термостата, а в случае нормальной работы продлить срок службы и принять меры по

мониторингу переходных параметров в системе охлаждения до получения «портрета» состояния, предшествующего отказу.

Искусственные нейронные сети для прогноза технического обслуживания. Известные системы управления в большинстве случаев ориентированы на регистрацию ограниченного числа параметров. Для проведения оценки технического состояния автомобиля используется система дистанционного управления, получающая всю информацию об измерениях параметров беспилотного транспортного средства. Это приводит к задержке реагирования на нештатные ситуации и аварийные режимы.

Для того чтобы построить качественную диагностическую систему роботизированного автомобиля, целесообразно использовать искусственные нейронные сети (ИНС), которые помогут выполнить указанный анализ.

Нейронная сеть ИНС используется для экстраполяции данных о тепловом поведении устройства во времени, когда внешние влияющие факторы изменяются так, что это приводит к отказу устройства. Это позволяет в режиме реального времени во время работы агрегата делать прогноз о его работоспособности.

Использование ИНС на рабочей станции с аналитическим модулем обеспечивает точность классификации технического состояния не менее чем 97 % [7, 8].

Преимущества такого подхода заключаются в следующем:

- использование глубоких сверточных нейронных сетей ориентировано на обработку изображений и их классификацию с высокой степенью точности [9];
- использование дополнительных измеряемых сигналов для диагностики приводит к упрощению структуры ИНС, что позволяет использовать сети типа персептрон.

Также возможно использование гибридной нейронной сети, где дополнительной функцией будет анализ временных рядов измеренных параметров, что позволит прогнозировать развитие аварийных состояний [2].

Важнейшим фактором успешной эксплуатации нейронных сетей является подготовка репрезентативной обучающей выборки. На основании ранее полученных данных о состоянии и отказах агрегатов автомобиля возможно формирование данных как при нормальной эксплуатации, так и при стендовых испытаниях.

Имитационные модели эксплуатации для выбора стратегии ТОиР на сетях Петри. Своевременное определение сроков технического обслуживания поможет сократить потери времени на изъятие и замену транспортных средств. С помощью разработанных имитационных моделей можно определить оптимальный состав резервных машин в соответствии с графиком выполнения задач и порядком обслуживания, что в свою очередь снижает эксплуатационные расходы. Постоянный мониторинг автономных автомобилей и их коррекция на основе имитационных моделей положены в основу системы прогнозного технического обслуживания. Кроме того, имитационные модели используются при виртуальных испытаниях в процессе проектирования роботизированных автомобилей [10, 11].

В настоящей статье описывается новая имитационная модель эксплуатации автомобиля, построенная на основе стохастической временной раскрашенной сети Петри. Эта модель предназначена для организации технического обслуживания на основе отдельных характеристик потоков отказов, а также для оценки состояния износа отдельных агрегатов автомобиля. Особое внимание в данном

транспортного средства, позволяющим ему выполнять задачи. В случае появления заявки на техническое обслуживание или отказа автомобиль выводится из эксплуатации и заменяется резервным автомобилем.

Моделирование проводилось методом статистических испытаний, что позволяет определить условия, необходимые для минимизации задержек выполнения работ, связанных с ремонтом или техническим обслуживанием. На основе анализа матриц предотказных состояний в системе CPN Tools можно установить такие законы распределения случайных величин, как Вейбулла, равномерное распределение, Пуассона, Эрланга, Стюдента, Бернулли и др. Заданные распределения случайных событий обеспечивают моделирование износа, деградации и дефектов в узлах автомобиля.

Использование предложенной модели на сетях Петри на рабочей станции с аналитическим модулем позволяет рассматривать стрессовые воздействия (температура, вибрация узлов, ударные нагрузки). Преимущество такого подхода состоит в том, что все данные мониторинга заранее будут проверяться на имитационной модели, прежде чем агрегаты или узлы выйдут из строя и поступят на станции технического обслуживания.

Заключение

В статье представлены результаты работ по созданию системы телематики и диагностики роботизированного автомобиля сельскохозяйственного назначения. К новым научным результатам можно отнести разработку структуры и функций рабочей станции с аналитическим модулем, а также создание новой имитационной модели роботизированного автомобиля, построенной на стохастической сети Петри. Использование матриц предотказных состояний, искусственных нейронных сетей и имитационных моделей в составе рабочей станции позволит распознать потерю работоспособности транспортного средства на ранних стадиях и сообщить об этом участникам производственного процесса. Это увеличивает шансы принять верное решение относительно допустимости использования всего ресурса автомобиля и обеспечивает необходимый уровень безопасности и надежности эксплуатации.

При интерпретации данных на рабочей станции можно спрогнозировать наиболее вероятные предаварийные состояния, своевременно провести техническое обслуживание и исправить обнаруженные ошибки, обеспечить чрезвычайно высокую надежность и производительность работы отдельных узлов, систем и агрегатов автомобилей с учетом всех возмущений внешней среды и процессов движения. Применение искусственной нейронной сети в аналитическом модуле рабочей станции системы диагностирования дает возможность осуществлять прогнозирование технического состояния узлов и систем автомобилей в режиме реального времени с последующей верификацией динамики процессов на имитационной модели на сети Петри.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гашенко Ю.В.* Принципы построения систем управления роботизированных транспортных средств с автономным и дистанционным режимом управления // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI Международной научно-технической конференции. Самара: Офорт, 2019. С. 107–110.
2. *Губанов Н.Г., Михеев Ю.В., Одинцов В.П., Ахтямов Р.Н., Морев А.С.* Архитектура системы диагностики и прогнозирования технического состояния роботизированного

- транспортного средства // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI международной конференции. Самара: Офорт, 2019. С. 171–174.
3. Орлов С.П., Сусарев С.В., Пугачев А.И. Интеллектуальная система диагностики агрегатов роботизированного автомобиля КАМАЗ // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI международной научно-технической конференции. Самара: Офорт, 2019. С. 92–95.
 4. Карпычев В.Ю. Информационные технологии в экономических исследованиях // Экономический анализ: теория и практика. 2013. № 20 (323). С. 1–10.
 5. Временные нормы эксплуатационного пробега шин автотранспортных средств. РД 3112199-1085-02.
 6. Susarev S.V., Orlov S.P., Gashenko Ju.V., Morev A.S., Alistarova N.V. Use of Previous Conditions Matrixes for the Vehicle on the Basis of Operational Information and Dynamic Models of Systems, Nodes and Units // Proceedings of 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). IEEE Xplore. 2019. Pp. 0514–0519.
 7. Гирин Р.В. Искусственная нейронная сеть для диагностики объектов по термограммам // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2018): Труды международной научно-технической конференции. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2018. С. 434–437.
 8. Порошин И.Е., Титов М.А. Использование искусственных нейронных сетей для параметрической идентификации объектов // Молодой ученый. 2020. № 26. С. 39–42.
 9. Николенко С.И., Кадурын А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2022. 480 с.
 10. Щербаков М.В., 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.
 11. 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.
 12. Орлов С.П., Сусарев С.В. Имитационные модели на сетях Петри для анализа процессов обслуживания и ремонта сложных технических систем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. № 30 (4). С. 49–75.
 13. 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 СПб ГТИ (ТУ). 2021. № 58 (84). С. 98–104.
 14. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets. URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (дата обращения 01.05.2023).

Статья поступила в редакцию 29 мая 2023 г.

TELEMATICS AND DIAGNOSIS SYSTEM FOR AUTONOMOUS CARGO VEHICLE

S.P. Orlov, E.A. Kosareva*

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

E-mail: orlovsp1946@gmail.com, katena_kosareva@inbox.ru

Abstract. *The article deals with the problem of managing the operation and maintenance of autonomous trucks KAMAZ using a telematics and diagnostics system. The functions and composition of the onboard module of a robotic vehicle are described. The main controlled values are determined. The presence of a developed system for monitoring the state of units and assemblies provides a solution to the problem of controlling the modes of the car operation. The structure of the telematics and diagnostics system has been developed and implemented. The main blocks of the proposed system are shown. The main diagnostic and forecasting functions are performed on a workstation with an analytical module. It is proposed to use an approach based on previous conditions matrixes. An example of matrix analysis for a car engine cooling system is given. Modeling of the engine cooling system was carried out and graphs of transient processes were obtained. The analytical module is designed using artificial neural networks to analyze time series of car parameter values. To conduct virtual tests of a car in various operating modes, a simulation model was developed on a stochastic time colored Petri net. The model simulates both the movement of the vehicle to the point of production operations and the change in the technical condition of the car. The model makes it possible to describe and study the influence of random factors on the time of execution of production tasks, to take into account the probabilistic characteristics of failure events or defects in vehicle components and assemblies. The use of an artificial neural network in the analytical module of the diagnostic system workstation makes it possible to predict the technical condition of vehicle components and systems in real time, followed by verification of the dynamics of processes on a simulation model on a Petri net.*

Keywords: *autonomous vehicles, diagnostics, transport telematics, previous conditions matrixes, artificial neural networks, simulation on Petri nets.*

REFERENCES

1. *Susarev S.V., Sidorenko K.V., Morev A.S., Gashenko Iu.V. Printsipy postroeniia sistem upravleniia robotizirovannykh transportnykh sredstv s avtonomnym i distantsionnym rezhimom upravleniia [Principles of constructing control systems for robotic vehicles with autonomous and remote control modes] // Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh: trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Samara: Ofort, 2019. Pp. 107–110. (In Russian).*
2. *Gubanov N.G., Mikheev Iu.V., Odintsov V.P., Akhtiamov R.N., Morev A.S. Arkhitektura sistemy diagnostiki i prognozirovaniia tekhnicheskogo sostoiianiia robotizirovannogo transportnogo sredstva [Architecture of a system for diagnosing and predicting the technical condition of a robotic vehicle] // Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh: trudy XXI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Samara: Ofort, 2019. Pp. 171–174. (In Russian).*
3. *Orlov S.P., Susarev S.V., Pugachev A.I. Intellectualaia sistema diagnostiki agregatov robotizirovannogo avtomobilia KAMAZ [Intelligent diagnostic system for units of a robotic KAMAZ vehicle] // Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh: trudy XXI*

* *Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Ekaterina A. Kosareva, Postgraduate Student.*

- Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii. Samara: Ofort, 2019. Pp. 92–95. (In Russian).
4. *Karpychev V.Iu.* Informatsionnye tekhnologii v ekonomicheskikh issledovaniyakh [Information technology in economic research] // Ekonomicheskii analiz: teoriia i praktika. 2013. № 20 (323). Pp. 1–10. (In Russian).
 5. Vremennyye normy ekspluatatsionnogo probega shin avtotransportnykh sredstv [Temporary standards for the operational mileage of vehicle tires]. RD 3112199-1085-02. (In Russian).
 6. *Susarev S.V., Orlov S.P., Gashenko Ju.V., Morev A.S., Alistarova N.V.* Use of Previous Conditions Matrixes for the Vehicle on the Basis of Operational Information and Dynamic Models of Systems, Nodes and Units // Proceedings of 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). IEEE Xplore. 2019. Pp. 0514–0519.
 7. *Girin R.V.* Iskusstvennaia neironnaia set dlia diagnostiki obiektov po termogrammam [Artificial neural network for diagnosing objects using thermograms] // Perspektivnye informatsionnye tekhnologii (PIT 2018): trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii. Samara: Izd. Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2018. Pp. 434–437. (In Russian).
 8. *Poroshin I.E., Titov M.A.* Ispolzovanie iskusstvennykh neironnykh setei dlia parametricheskoi identifikatsii obiektov [Using artificial neural networks for parametric identification of objects] // Molodoi uchenyi. 2020. № 26. Pp. 39–42. (In Russian).
 9. *Nikolenko S.I., Kadurin A.A., Arkhangel'skaia E.O.* Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neironnykh setei [Deep learning. Dive into the world of neural networks]. SPb.: Piter, 2022. 480 p. (In Russian).
 10. *Shcherbakov M.V., Sai Van.K.* Arkhitektura sistemy predskazatel'nogo tekhnicheskogo obsluzhivaniia slozhnykh mnogoobiektnykh sistem v kontseptsii Industrii 4.0 [Architecture of a predictive maintenance system for complex multi-object systems in the Industry 4.0 concept] // Programmnye produkty i sistemy. 2020. № 2. Pp. 186–194. (In Russian).
 11. *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.
 12. *Orlov S.P., Susarev S.V.* Imitatsionnye modeli na setiakh Petri dlia analiza protsessov obsluzhivaniia i remonta slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Simulation models on Petri nets for analyzing maintenance and repair processes of complex technical systems] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki, 2022. № 30 (4). Pp. 49–75. (In Russian).
 13. *Susarev S.V., Orlov S.P., Biziukova E.E., Uchaikin R.A.* Primenenie modelei na setiakh Petri pri organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniia avtonomnykh agrotekhnicheskikh transportnykh sredstv [Application of models on Petri nets in organizing the maintenance of autonomous agricultural vehicles] // Izvestiia SPbGTI (TU). 2021. № 58 (84). Pp. 98–104. (In Russian).
 14. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets. URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (accessed 01.05.2023).

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

УДК 519.68

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА БИНАРНО-КВАНТОВАННЫХ СИГНАЛОВ

А.В. Машков*

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

E-mail: mavstu@list.ru

Аннотация. Рассматривается методика и шаблон проектирования комплекса структурно, функционально, информационно и метрологически совместимых программных модулей, реализующих алгоритмы вычисления оценок спектральной плотности мощности (СПМ) на основе бинарно-знакового аналого-стохастического квантования с пониженной мультипликативной сложностью. Алгоритмическое обеспечение позволяет вычислять оценки СПМ методом усредненных модифицированных периодограмм и коррелограммным методом с использованием временных корреляционных окон на основе дискретно-временного представления бинарно-знакового аналого-стохастического квантования. Данный подход позволил вычислить операции интегрирования аналитически. Это исключает методическую погрешность, вызванную выполнением этих операций в цифровом виде. Кроме того, операции умножения вырождаются в процедуры, которые в основном требуют выполнения арифметических операций суммирования и вычитания значений интегральных преобразований весовых оконных функций, что существенно снижает трудоемкость оценивания СПМ.

Ключевые слова: спектральная плотность мощности, бинарно-знаковое аналого-стохастическое квантование, сложный многокомпонентный сигнал, метрологически значимое программное обеспечение, цифровой алгоритм, компонентно-ориентированная парадигма.

Введение

Одной из актуальных задач анализа сигналов является оценка их частотного состава. При этом в таких областях, как вибродиагностика, акустика, управление динамическими объектами, диагностика технического состояния и неразрушающий контроль сложных систем, требуется анализ частотного состава сложных многокомпонентных сигналов. Сложные многокомпонентные сигналы

* Андрей Валерьевич Машков, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии».

характеризуются наличием случайной составляющей и представляют собой конечную смесь зашумленных узкополосных составляющих локально распределенных в пределах широкого диапазона частот. Это приводит к тому, что одним из основных направлений прикладных и научных исследований в области информационно-измерительных технологий является разработка высокопроизводительных вычислительных алгоритмов с учетом разработки на их основе метрологически значимого программного обеспечения (ПО), которое может быть использовано в составе комплексного ПО ИИС для частотного анализа сложных многокомпонентных сигналов. В ходе разработки таких алгоритмов следует учитывать, что они станут основой построения метрологически значимого ПО, которое будет использоваться в составе комплексного ПО информационно-измерительной системы (ИИС) для частотного анализа сложных многокомпонентных сигналов.

Основная часть

В процессе частотного анализа сложных многокомпонентных сигналов используются статистические методы обработки результатов наблюдения их текущих реализаций и находится оценка спектральной плотности мощности (СПМ). Одними из основных и наиболее применяемых на практике методов оценивания СПМ являются периодограммный и коррелограммный методы [1]. При этом с целью улучшения статистических характеристик получаемых оценок СПМ применяют оконные функции [2, 3].

Оценка СПМ, вычисляемая периодограммным методом с применением оконной функции, получила название модифицированной периодограммной оценки СПМ и в аналоговом виде вычисляется следующим образом [1]:

$$\hat{S}_{xx}(f, T) = \frac{1}{TU} \left| \int_0^T w(t) \overset{\circ}{x}(t) \exp(-j2\pi ft) dt \right|^2, \quad (1)$$

где $\overset{\circ}{x}(t)$ – центрированная реализация анализируемого сигнала; T – длительность реализации сигнала, подлежащего обработке; $w(t)$ – весовая оконная функция; U – средняя мощность оконной функции.

Для получения статистически устойчивой оценки периодограммным методом осуществляется вычисление оценок СПМ по нескольким сегментам реализации сигнала с последующим их усреднением. В результате имеем [1]:

$$\hat{S}_{xx}(f, T) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{S}_{xx}(m, f, T), \quad (2)$$

где M – число сегментов, которые могут перекрываться [3], а $\hat{S}_{xx}(m, f, T)$ – оценка СПМ, вычисленная для m -го сегмента согласно (1).

Вычисление оценки СПМ согласно (2) получило название усредненной модифицированной периодограммной оценки СПМ.

В свою очередь, для вычисления оценки СПМ $\hat{S}_{xx}(f)$ коррелограммным методом в аналоговом виде имеем:

$$\hat{S}_{xx}(f) = 2 \int_0^T w(\tau) \hat{R}_{xx}(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau, \quad (3)$$

где $\hat{R}_{xx}(\tau)$ – оценка корреляционной функции (КФ) анализируемого сигнала.

В настоящее время преимущественно используется цифровой подход к реализации алгоритмов для оценки СПМ. Вычисление оценки СПМ периодограммным (1) и коррелограммным (3) методами в дискретном виде соответственно осуществляется следующим образом [1]:

$$\hat{S}_{XX}(f_k, N) = \frac{\Delta t}{NU} \left| \sum_{i=0}^{N-1} w(i\Delta t) x(i\Delta t) \exp(-j2\pi f_k n) \right|^2; \quad (4)$$

$$\hat{S}_{XX}(f_k) = 2\Delta t \sum_{v=0}^{N-1} w(i\Delta t) \hat{R}_{XX}(i\Delta t) \cos 2\pi k \Delta f i \Delta t, \quad (5)$$

где N – количество отсчетов в каждом сегменте.

Однако при классическом подходе к цифровому оцениванию СПМ априори предполагается, что обработке подвергаются данные, полученные в результате равномерной дискретизации и многоуровневого квантования реализации сигнала. Вследствие этого переход от аналоговой формы к цифровым алгоритмам вычисления оценок СПМ приводит к необходимости вычисления большого количества операций умножения. В случае периодограммного метода приходится осуществлять операции перемножения отсчетов реализации сигнала с отсчетами оконной функции и вычислять дискретные косинус- и синус-преобразования. В случае коррелограммного метода осуществляются операции перемножения отсчетов оценки КФ с отсчетами функции корреляционного окна и вычисляется дискретное косинус-преобразование.

При классическом подходе к разработке алгоритмов цифровой обработки сигналов не учитывается роль аналого-цифрового преобразования как первичного преобразования, которое может обеспечить предварительную обработку сигналов с последующим упрощением вычислительных процедур. Использование специального вида аналого-цифрового преобразования открывает возможность для разработки экономичного в вычислительном отношении (с пониженной мультипликативной сложностью) алгоритмического обеспечения частотного анализа. Одним из перспективных направлений первичного цифрового преобразования сигналов является бинарно-знаковое аналого-стохастическое квантование [4, 5].

Специфика применения бинарно-знакового аналого-стохастического квантования заключается в том, что при переходе к цифровым алгоритмам операции интегрирования вычисляются аналитически. В результате сокращается общее число операций цифрового умножения.

Результат бинарно-знакового аналого-стохастического квантования сигнала представляется в виде значений $+1$ и -1 [6, 7]:

$$z(t) = \begin{cases} +1, & x(t) + \xi(t) \geq 0; \\ -1, & x(t) + \xi(t) < 0. \end{cases} \quad (6)$$

В (5) $\xi(t)$ – вспомогательный рандомизирующий сигнал, значения которого выбираются с учетом выполнения неравенства

$$\xi_{\max} \geq \sup(|x_{\inf}|, |x_{\sup}|), \quad (7)$$

где оператор $\sup(\dots)$ предполагает выбор наибольшего по абсолютному значению из $x_{\inf}$ и $x_{\sup}$.

Вспомогательный сигнал $\xi(t)$ имеет равномерный закон распределения, и его изменение перекрывает диапазон возможных значений полезного сигнала.

В [8–11] показано, что с учетом специфики формирования результата бинарно-знакового аналого-стохастического квантования $z(t)$ его можно рассматривать как непрерывный во времени сигнал. В связи с этим вычисление для m -го сегмента $z(m, t)$ модифицированной периодограммной оценки СПМ $\hat{S}_{XX}(f)$ будет осуществляться следующим образом [12]:

$$\hat{S}_{XX}(m, f, T) = \frac{\xi_{\max}^2}{TU} \left(\left(\int_0^T z(m, t) w(t) \cos 2\pi f t dt \right)^2 + \left(\int_0^T z(m, t) w(t) \sin 2\pi f t dt \right)^2 \right). \quad (8)$$

Результат бинарно-знакового аналого-стохастического квантования $z(m, t)$ принимает значения $+1$ и -1 . Поэтому интегралы в (8) вычисляются аналитически. С учетом этого получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \int_0^T z(m, t) w(t) \cos 2\pi f t dt = \\ = -z(t_{H,m}) \left((-1)^{r(m)} W_{\cos}(T, f) - W_{\cos}(0, f) - 2 \sum_{j=0}^{r(m)+1} (-1)^j W_{\cos}(t_{j,m}, f) \right); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \int_0^T z(m, t) w(t) \sin 2\pi f t dt = \\ = -z(t_{H,m}) \left((-1)^{r(m)} W_{\sin}(T, f) - W_{\sin}(0, f) - 2 \sum_{j=1}^{r(m)} (-1)^j W_{\sin}(t_{j,m}, f) \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где $z(t_{H,m})$ – начальное значение для m -го сегмента $z(m, t)$, $t_{j,m}$ – моменты времени смены значений сегмента $z(m, t)$, $r(m)$ – число значений отсчетов моментов времени $t_{j,m}$ для m -го сегмента $z(m, t)$, а $W_{\cos}$ и $W_{\sin}$ – результаты косинус- и синус-преобразований оконной функции $w(t)$.

Соотношения (8), (9) и (10) позволяют вычислить оценки СПМ методом усредненных модифицированных периодограмм. Особенностью реализации этих соотношений является то, что в их основе лежит выполнение логических операций и простых арифметических операций, связанных с суммированием и вычитанием дискретных значений оконных функций, а операции умножения практически отсутствуют. При этом вычисление косинус- и синус-интегральных преобразований от оконных функций осуществляется аналитически.

При вычислении коррелограммной оценки СПМ обработке подвергаются два параллельно сформированных результата знакового преобразования $z_1(t)$ и $z_2(t)$ с использованием двух вспомогательных сигналов $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$. Оценка КФ будет иметь вид [13]

$$\hat{R}_{XX}(\tau) = \frac{\xi_{\max}^2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} z_1(t) z_2(t + \tau) dt. \quad (11)$$

С учетом (11) оценка СПМ (3) будет равна

$$\hat{S}_{xx}(f) = \frac{2\zeta_{\max}^2}{T} \int_0^T \int_{t_0}^{t_0+T} z_1(t) z_2(t+\tau) h(\tau) \cos 2\pi f \tau \, dtd\tau, \quad (12)$$

где $h(\tau)$ – функция корреляционного окна.

Значения $z_1(t)$ равны +1 и –1, их смена происходит в моменты времени $t_i^{z_1}$. В начальный момент времени анализа имеем $t_0^{z_1} = 0$. С учетом этого в (12) интеграл по времени t вычисляется аналитически. В свою очередь по времени задержки τ осуществим равномерную дискретизацию с шагом $\Delta\tau$. Тогда коррелограммная оценка СПМ вычисляется следующим образом [14]:

$$\begin{aligned} \hat{S}_{xx}(k\Delta f) = & 2Q(T, k\Delta f) \hat{R}_{xx}(T) - 2Q(0, k\Delta f) \hat{R}_{xx}(0) + \\ & + 2z_1(t_0) \zeta_{\max}^2 T^{-1} \Delta\tau \sum_{j=0}^{J-1} C(j\Delta\tau) Q(j\Delta\tau, k\Delta f); \end{aligned} \quad (13)$$

$$C(j\Delta\tau) = z_2(j\Delta\tau) + (-1)^J z_2(j\Delta\tau + T) + 2 \sum_{i=1}^{J-1} (-1)^i z_2(j\Delta\tau + t_i^{z_1}); \quad (14)$$

$$Q(t, f) = \int h(t) \cos 2\pi f t \, dt. \quad (15)$$

В (15) $Q(t, f)$ представляет собой результат интегрального косинус-преобразования Фурье функции корреляционного окна $h(t)$.

Применение бинарно-знакового аналого-стохастического квантования для вычисления оценок СПМ коррелограммным методом с использованием временных корреляционных окон позволило осуществить аналитическое вычисление интеграла от функции корреляционного окна. При этом в отличие от классических алгоритмов, реализующих коррелограммный метод, не требуется предварительно вычислять оценки КФ, а достаточно знать только оценки двух ее значений $\hat{R}_{xx}(0)$ и $\hat{R}_{xx}(T)$. Все это приводит к упрощению в вычислительном отношении получения коррелограммной оценки СПМ [12].

На основе соотношений (8)–(10) и (12)–(15) разработано метрологически значимое ПО для вычисления оценок СПМ методом усредненных модифицированных периодограмм и коррелограммным методом [15]. В процессе разработки использованы методологии и интегрированные среды, обеспечивающие выполнение комплекса взаимосвязанных работ по созданию программных модулей и позволяющие реализовать метрологически значимое ПО с учетом набора общих и специальных требований к ПО.

К общим относятся требования к структуре ПО, к влиянию ПО на метрологические характеристики ИИС, к защите ПО и исходных данных. К специальным относятся требования к разделению ПО и требования, предусматривающие технологии масштабирования ПО, расширения и модификации модулей, вычислительных процедур загрузки, обработки и хранения исходных данных, которые вызывают изменения метрологически значимой части ПО [16, 17].

Для удовлетворения предъявляемых требований был сделан выбор в пользу компонентно-ориентированного подхода, который определил структуру метрологически значимого ПО в виде совокупности метрологически независимых программных модулей с возможностью их комплексирования и параллельного выполнения вычислительных процедур получения оценок СПМ. Назначение и функциональные возможности модулей были логически разделены на уровни представления и обработки измерительных данных. На этой структуре уровень представления соответствует метрологически незначимой части ПО, позволяющий работать в диалоговом режиме, управлять измерительными компонентами и отвечает за графическое представление исходных данных и результата спектрального анализа. Уровень обработки данных соответствует метрологически значимой части ПО и содержит программные компоненты реализации алгоритмов вычисления оценок СПМ.

Модульная парадигма организации структуры ПО позволила удовлетворить требованию о недопустимости искажающего воздействия на метрологически значимые его части через интерфейс пользователя и интерфейс передачи данных.

Основным требованием, предъявляемым к прикладному ПО ИИС, является гибкость в предоставлении, поддержке и модификации программных компонент. Это позволяет осуществлять их комплексирование и создавать мобильные, интегрированные программные структуры. На рис. 1 показана структурная схема метрологически значимого ПО в виде взаимодействия модулей и организации обмена данными между ними.

Уровень представления реализован на строго типизированном объектно-ориентированном языке программирования Java, а уровень обработки, хранения и передачи измерительной информации – на статически типизированном языке программирования общего назначения C++. Использование языка Java обеспечило создание программных конструкций с возможностью повторного использования с минимальными модификациями или без них на самых различных компьютерных платформах, что повышает мобильность метрологически значимого ПО. Так как при цифровой обработке сигналов периодически используется четко определенный набор математических инструментов с небольшими вариациями параметров, то модульность C++ имеет значительные преимущества в программировании приложений цифровой обработки сигналов. Структуры данных C++ позволяют разрабатывать подпрограммы и объекты внешних библиотек, которые можно использовать в качестве строительных блоков ИИС. Также C++ предоставляет широкий набор средств параллельной и многопоточной обработки больших массивов данных, что позволяет повысить производительность выполнения измерительных процедур [18]. Интеграция и обмен данными между взаимодействующими модулями, написанными на различных языках программирования, осуществляется через программный интерфейс, который представляет собой конвертор обработки данных между программными компонентами уровней представления и обработки данных.

Модули метрологически значимого ПО, представленные на рис. 1, реализованы в виде классов-контейнеров. Каждый класс-контейнер содержит классы, которые реализуют соответствующую логику и функциональность модулей. В таблице показано соответствие программных модулей и классов-контейнеров метрологически значимого ПО.

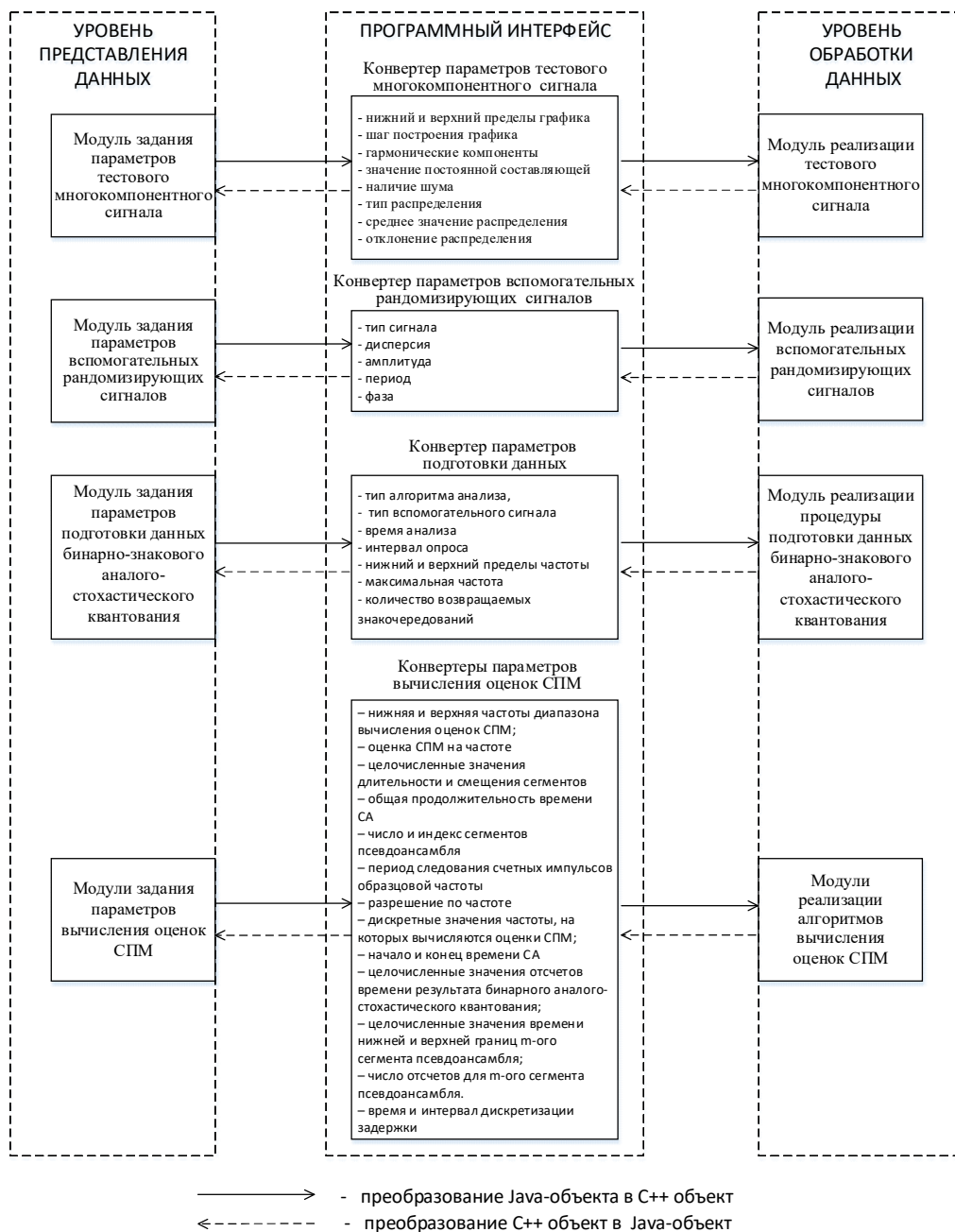


Рис. 1. Структура взаимодействия модулей метрологически значимой и незначимой частей ПО через конвертер обработки данных

Состав классов-контейнеров и их функциональное назначение

Модули ПО	Классы-контейнеры	Функциональное назначение
Модули задания параметров и реализации модели тестового многокомпонентного сигнала	QuantumBridge	Осуществляет загрузку нативных библиотек для запуска кода под управлением виртуальной машины Java, реализованной на языке C++
	JNIRandomProcessModel	Загрузка и передача общих параметров модели тестового многокомпонентного сигнала
	JNIRandomProcessComponent	Обработка параметров гармонических составляющих тестового многокомпонентного сигнала
Модуль задания параметров и реализации процедуры подготовки данных бинарно-знакового аналого-стохастического квантования	JNIExcelProcessData	Загрузка и передача общих параметров об анализируемом реальном сигнале из внешних накопителей
	JNIExcelProcessComponent	Обработка служебной информации об анализируемом реальном сигнале
	JNIExcelSeriesResearch	Формирование параметров для спектрального анализа анализируемого реального сигнала
	JNIExcelSeriesComponent	Обработка и передача результатов спектрального анализа анализируемого реального сигнала
Модули задания параметров и реализации алгоритмов вычисления оценок СПМ	JNIFourierData	Задание параметров и реализация вычислительных процедур алгоритмов получения оценок СПМ

На рис. 2 приведена диаграмма взаимодействия классов-контейнеров модулей в процессе вызова управляющих процедур и обмена информацией между модулями метрологически значимого ПО.

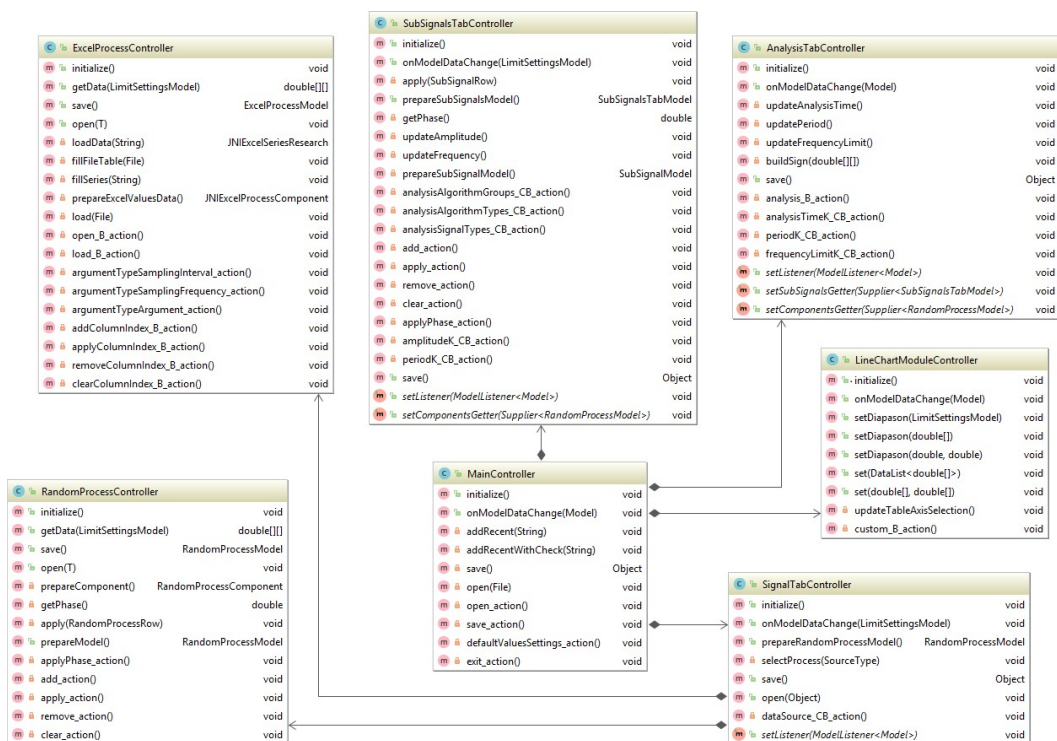


Рис. 2. Диаграмма взаимодействия классов-контейнеров метрологически значимого ПО

Как было сказано выше, вычислительная эффективность алгоритмов вычисления оценок СПМ периодограммным и коррелограммным методами основывается на использовании результатов бинарно-знакового аналого-стохастического квантования. Разработанное ПО предоставляет возможность использовать в вычислениях данные результатов аналого-стохастического квантования, полученных либо в ходе процедур имитации такого квантования, либо непосредственно с блока бинарно-знакового аналого-стохастического преобразователя. Варианты получения данных результатов бинарно-знакового аналого-стохастического квантования определяют тип режима функционирования метрологически значимого ПО: тестовые испытания ПО или штатный режим функционирования ПО. Режим тестовых испытаний позволяет оценить метрологические свойства алгоритмов вычисления оценок СПМ, а штатный режим функционирования позволяет работать в режиме реального времени, обрабатывая реальные сигналы.

Логика управления программой в режимах тестовых испытаний и штатного функционирования, последовательность команд вызова процедур ввода, обработки, анализа результатов и хранения информации показаны на рис. 3.

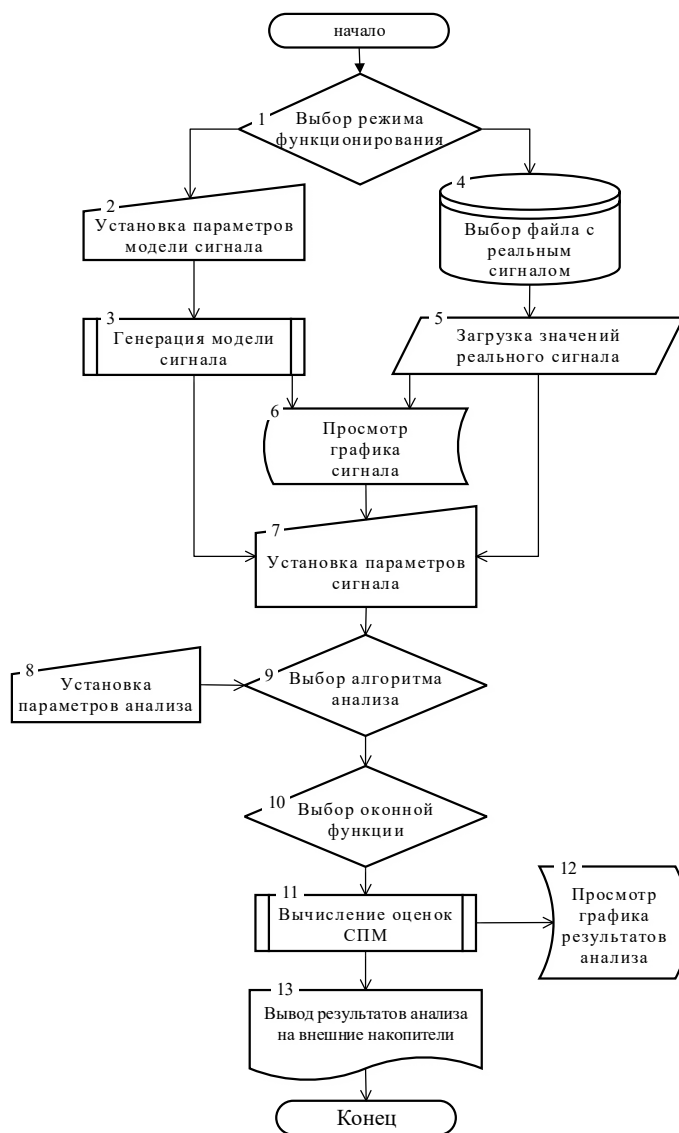


Рис. 3. Схема алгоритма работы метрологически значимого ПО

После запуска приложения осуществляется выбор режима функционирования (Блок 1). Для модели сигнала необходимо задать гармонические компоненты и их параметры: амплитуду, частоту и фазу (Блок 2). Опционально можно задать параметры шума сигнала. Этап генерации модели сигнала (Блок 3) может быть инициирован во время просмотра графика сигнала (Блок 6) по запросу «Просмотреть», а также во время вычисления оценок СПМ (Блок 11). Генерация координат модели сигнала (Блок 3) происходит параллельно для отдельных его фрагментов. Так, например, первая и вторая половины графика будут вычислены на разных процессорах, что позволит повысить быстродействие. Для реального сигнала необходимо выбрать файл с данными в формате *.csv или *.xlsx (Блок 4). После загрузки реального сигнала (Блок 5) можно просмотреть загруженные данные в виде графика (Блок 6). Далее производится установка параметров вспомогательного сигнала (Блок 7). Для вспомогательного сигнала необходимо

вести амплитуду, частоту и фазу. Подсчет координат графика будет аналогично произведен параллельно для каждой его части. После установки параметров анализа (Блок 8) можно произвести сам анализ введенного сигнала по выбранному алгоритму (Блок 9). Затем необходимо выбрать оконную функцию (Блок 10). Некоторые фрагменты алгоритма, такие как подсчет разницы введенного и вспомогательного сигнала, последовательно независимые массивы данных, подсчет результирующих амплитуд, фазовых спектров и нормированных величин, производятся параллельно. После выполнения процедуры вычисления оценок СПМ (Блок 11) можно просмотреть график результатов анализа (Блок 12), который аналогично модели сигнала вычисляется параллельно, и сохранить результаты на внешние накопители (Блок 13). Выходными данными программы являются дискретные значения оценки спектральной плотности мощности, а также их нормированные значения в относительных единицах и децибелах. Для вывода результатов вычислений используются табличные и графические способы.

Заключение

Процедура первичного аналого-цифрового преобразования рассматривается как одна из основных процедур цифровой обработки сигналов, которая обеспечивает предварительную обработку и определяет все последующее исследование частотного состава сложных многокомпонентных сигналов. В соответствии с этим в качестве первичного преобразования используется бинарно-знаковое аналого-стохастическое квантование, т. к. оно позволяет аналитически вычислить интегральные операции в процессе перехода от аналоговой формы к цифровым алгоритмам. Благодаря этому свойству полученные выше математические соотношения обеспечивают существенное сокращение операций умножения, что уменьшает вычислительную сложность алгоритмов для вычисления периодограммных и коррелограммных оценок СПМ. На основе синтезированных алгоритмов разработано метрологически значимое ПО, которое может быть использовано в составе комплексного ИИС для частотного анализа сложных многокомпонентных сигналов. Компонентно-ориентированная парадигма и разделение метрологически значимой и незначимой частей ПО на отдельные уровни абстракции позволили реализовать метрологически значимое ПО в виде совокупности метрологически совместимых программных модулей с возможностью их комплексирования, модификации и повторного использования. Модульный подход существенно расширяет возможности для создания мобильных, интегрированных программных структур в составе комплексного ПО ИИС, ориентированного на проведение частотного анализа в условиях ограничения по времени обработки, в таких областях, как акустика, гидролокация, вибродиагностика и неразрушающий контроль и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Marpl Jr.S.L.* Digital Spectral Analysis: With Applications. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1987. 492 p.
2. *Дворкович В.П., Дворкович А.В.* Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М.: Техносфера, 2014. 112 с.
3. *Prabhu K.M.* Window Functions and Their Applications in Signal Processing. CRC Press, 2013. 382 p.
4. *Belinsky A.A.* Spectral Analysis of Relativistic Operators // Hardcover – October 15, 2010. 200 p.
5. *Горбунов Ю.Н., Лобанов Б. С., Куликов Г.В.* Введение в стохастическую радиолокацию: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 376 с.

6. *Max J.* Methodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Vol. 1. Principes generaux et methodes classiques. Paris: Masson, 1996. XXVII. 355 p.
7. *Мирский Г.Я.* Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
8. *Якимов В.Н.* Математическое представление потоков дискретного знакового преобразования непрерывных сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2000. № 8. С. 190–192.
9. *Якимов В.Н.* Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4–7. С. 1346–1353.
10. *Якимов В.Н.* Цифровой гармонический анализ многокомпонентных случайных процессов // Измерительная техника. 2006. № 4. С. 22–26.
11. *Якимов В.Н., Машков А.В.* Знаковый алгоритм анализа спектра амплитуд и восстановления гармонических составляющих сигналов в условиях присутствия некоррелированных фоновых шумов // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 2. С. 83–90.
12. *Якимов В.Н., Машков А.В., Горбачев О.В.* Цифровой гармонический анализ на основе метода усреднения Фурье-преобразования псевдоансамбля сегментов знакового сигнала // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 2. С. 31–34.
13. *Якимов В.Н., Машков А.В.* Алгоритм вычисления оценки спектральной плотности мощности на основе обработки знаковых сигналов с использованием временных весовых функций // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 4. С. 3–8.
14. *Якимов В.Н., Машков А.В.* Цифровое оценивание моментов корреляционной функции на основе знакового аналого-стохастического квантования случайного процесса // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 11–13.
15. *Якимов В.Н., Машков А.В., Желонкин А.В.* Специализированное программное обеспечение измерительной системы для оперативного оценивания спектрального состава многокомпонентных процессов // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32. № 1. С. 159–166.
16. ГОСТ 8.654-2015 Требования к программному обеспечению средств измерения. Введ. 2015-04-28. М.: Стандартиформ, 2015. 8 с.
17. ГОСТ 8.596-2002 Метрологическое обеспечение измерительных систем. Введ. 2003-03-01. М.: Стандартиформ, 2003. 10 с.
18. *Bloch J.* Effective Java. Third Edition, Addison-Wesley Professional, 2018. 412 p.

Статья поступила в редакцию 21 июня 2023 г.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR INFORMATION-MEASURING SYSTEMS FOR FREQUENCY ANALYSIS OF BINARY-QUANTIZED SIGNALS

*A.V. Mashkov**

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

Abstract. *The article discusses the methodology and design template for a complex of structurally, functionally, informationally and metrologically compatible software modules that implement algorithms for calculating estimates of the PSD power spectral density based on binary-signed analog-stochastic quantization with reduced multiplicative complexity. Algorithmic support makes it possible to calculate PSD estimates by the method of averaged modified periodograms and by the correlogram method using time correlation windows based on a discrete-event representation of the results of binary-sign analog-stochastic quantization. This approach made it possible to perform integration operations analytically, which eliminates the methodological error caused by performing these operations in digital form. In addition, the multiplication operations degenerate into procedures that basically require the execution of logical operations and simple arithmetic operations of summing and subtracting the values of the correlation windows, which significantly reduces the complexity of estimating the PSD.*

Keywords: *complex multicomponent signal, binary-sign analog-stochastic quantization, metrologically significant software, power spectral density, periodogram method, correlogram method, computational complexity of algorithms, component-oriented paradigm.*

REFERENCES

1. *Marpl Jr.S.L.* Digital Spectral Analysis: With Applications. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1987. 492 p.
2. *Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V.* Okonnye funkci dlya garmonicheskogo analiza signalov [Window functions for harmonic signal analysis]. M.: Tehnosfera, 2014. 112 p. (In Russian).
3. *Prabhu K.M.* Window Functions and Their Applications in Signal Processing. CRC Press, 2013. 382 p.
4. *Belinsky A.A.* Spectral Analysis of Relativistic Operators // Hardcover– October 15, 2010. 200 p.
5. *Gorbunov Yu.N., Lobanov B.S., Kulikov G.V.* Vvedenie v stohasticheskuyu radiolokatsiyu: uchebnoe posobie dlya vuzov [Introduction to Stochastic Radar]. M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2015. 376 s. (In Russian).
6. *Max J.* Methodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Tome 1. Principes generaux et methodes classiques. Paris: Masson, 1996. – XXVII. 355 p.
7. *Mirsky G.Ya.* Harakteristiki stohasticheskoy vzaimosvyazi i ih izmereniya [Characteristics of stochastic relationships and their measurement]. M.: Energoizdat, 1982. 320 p. (In Russian).
8. *Yakimov V.N.* Matematicheskoe predstavlenie potokov diskretnogo znakovogo preobrazovaniya nepreryvnykh signalov [A mathematical representation of flows of discrete symbolic transformation of continuous signals] // Vest. Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Tekhnicheskie nauki [Bulletin of Samara state technical University. Series: Technical Sciences]. 2000. № 8. Pp. 190–192. (in Russian).
9. *Yakimov V.N.* Cifrovoy kompleksnyy statisticheskij analiz na osnove znakovogo predstavleniya sluchaynykh processov [Digital complex statistical analysis based on the sign-function representation of random processes] // Izvestiya samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk – Izvestia of Samara scientific center of the Russian academy of sciences. 2016. Vol. 18. No. 4 (7). Pp. 1346–1353. (In Russian).

* *Andrej V. Mashkov, Senior Lecturer.*

10. *Yakimov V.N.* Digital harmonic analysis of multicomponent random processes // *Measurement Techniques*. 2006. Vol. 49. No. 4. Pp. 341–347.
11. *Yakimov V.N., Mashkov A.V.* Znakovyy algoritm analiza spektra amplitud i vosstanovleniya garmonicheskikh sostavlyayushchih signalov v usloviyah prisutstviya nekorrelirovannykh fonovykh shumov [The binary algorithm for the analysis of the spectrum amplitude and recover of harmonic components signals in the presence of uncorrelated background noise] // *Nauchnoe priborostroenie – Scientific Instrument Making*. 2017. Vol. 27. No. 2. Pp. 83–90. (in Russian).
12. *Yakimov V.N., Mashkov A.V., Gorbachev O.V.* Tsifrovoy garmonicheskiy analiz na osnove metoda usredneniya Fur'ye-preobrazovaniya psevdoansamblya segmentov znakovogo signala [Digital harmonic analysis based on the method of averaging the Fourier transform of a pseudo-ensemble of segments of a signed signal] // *Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]*. 2016. No. 2. Pp. 31–34. (in Russian).
13. *Yakimov V.N., Mashkov A.V.* Algoritm vychisleniya ocenki spektral'noy plotnosti moshchnosti na osnove obrabotki znakovykh signalov s ispol'zovaniem vremennykh vesovykh funktsiy [Algorithm to compute estimate of a power spectral density based on sign signal processing using time-weighting functions] // *Tsifrovaya obrabotka*. 2016. No. 4. Pp. 3–8. (In Russian).
14. *Yakimov V.N., Mashkov A.V.* Digital estimation of correlation function moments using analog-stochastic sign quantization of a random process // *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59. No. 1. Pp. 12–15.
15. *Yakimov V.N., Mashkov A.V., Zhelonkin A.V.* Specializirovannoe programmnoe obespechenie izmeritel'noy sistemy dlya operativnogo ocenivaniya spektral'nogo sostava mnogokomponentnykh processov [Specialized software of the measuring system for rapid assessment of the spectral composition of multicomponent processes] // *Programmnye produkty i sistemy*. 2019. Tom 32. № 1. Pp. 159–166. (In Russian).
16. GOST 8.654-2015 Trebovaniya k programmnomu obespecheniyu sredstv izmereniya [Requirements for software of measuring instruments]. Vved. 2015-04-28. M.: Standartinform, 2015. 8 p.
17. GOST 8.596-2002 Metrologicheskoe obespechenie izmeritel'nykh system [Metrological support of measuring systems]. Vved. 2003-03-01. M.: Standartinform, 2003. 10 p.
18. *Bloch J.* Effective Java. Third Edition, Addison-Wesley Professional, 2018. 412 p.

Энергетика и электротехника

УДК 537.528

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОДГОТОВКИ НАНОМАСЛА НА ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

В.А. Лоскутов, Я.Г. Прокопенко, А.В. Ридель, Л.П. Горева *

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

E-mail: blackline05@yandex.ru, yakovprokopenko@mail.ru, ridel@corp.nstu.ru, goreva@corp.nstu.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментов, направленных на определение пробивного напряжения жидкостей, содержащих углеродные нанотрубки и другие микровключения, которые были диспергированы в минеральном изоляционном масле, используемом в электрических трансформаторах. Жидкость получали различными способами с обязательным использованием ультразвукового диспергатора. Электрическая прочность наномасла на основе углеродных нанотрубок оказалась значительно меньше электрической прочности наномасла на основе наноксидов цинка и титана. При малых концентрациях значения электрической прочности примерно соответствуют значениям электрической прочности чистой жидкости, однако с ростом концентрации электрическая прочность всех наножидкостей уменьшается. Показано, что технология приготовления наножидкости оказывает сильное влияние на ее напряжение пробоя.

Ключевые слова: трансформаторное масло, трансформатор, электрическая прочность, диспергирование, углеродные нанотрубки, наноксид титана, наноксид цинка, микровключения.

Введение

Для обеспечения безаварийной эксплуатации силовых трансформаторов требуется качественная изоляция со стабильными электрическими параметрами. В России наибольшее распространение в качестве жидкой изоляции получили минеральные масла марок ГК и ВГ. Ряд исследований, направленных на улучшение их электрических характеристик, показывают, что при введении добавок электрическая прочность трансформаторного масла возрастает [1–6], а иногда убывает [7]. Анализ публикаций [1–6] показал, что условия проведения исследований у различных научных групп отличались. К основным различиям можно

* Виктор Александрович Лоскутов, аспирант.

Яков Геннадьевич Прокопенко, студент.

Александр Викторович Ридель, кандидат технических наук, доцент.

Людмила Павловна Горева, кандидат технических наук, доцент.

отнести: мощность ультразвукового диспергатора, время воздействия, методики измерений и подготовки самих образцов наножидкости. Эти факторы не позволяют однозначно интерпретировать результаты исследований. Таким образом, необходимо изучить условия подготовки проб масла и методику диспергирования для улучшения качества эксперимента и минимизации влияния процесса агломерации. Для оценки электрической прочности наножидкостей использовался высоковольтный испытательный аппарат СКАТ-М100В с латунными электродами и подачей синусоидального переменного напряжения с частотой 50 Гц, в соответствии с ГОСТ 6581-75.

Трансформатор представляет собой ключевой элемент современной энергосетевой системы для передачи и распределения электроэнергии. Без него энергосистема просто не смогла бы масштабироваться для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию. Он очень важен для обеспечения надежности и безопасности электроэнергетической системы. Большинство трансформаторов, находящихся в эксплуатации во многих странах, приближаются к расчетному сроку службы или превышают его. В связи с этим акцент смещается в сторону улучшения эксплуатационной надежности этих существующих устройств.

Данные по отказам трансформаторов показывают, что средний срок их службы составляет порядка 18 лет, что намного меньше ожидаемого срока службы трансформатора – 35–40 лет. Подчеркнем, что согласно данным [8, 9] около 75 % отказов высоковольтных трансформаторов вызваны проблемами с изоляцией, а именно с состоянием бумажно-масляной изоляции [10–11].

Трансформаторное масло широко используется в силовых установках благодаря своим превосходным электрическим и тепловым характеристикам. Широкое применение минерального масла для высоковольтной изоляции и охлаждения энергетических аппаратов послужило толчком для проведения обширных исследований, направленных на улучшение его электрических характеристик с помощью нанотехнологий. На данный момент исследования теплопроводности жидкостей достаточно углублены и становится ясным, что введение наноматериалов приводит к увеличению теплопроводности. Например, в статье [12] указывается, что добавление оксидов металла в наножидкости с объемной концентрацией частиц 6–8 % приводит к повышению теплопроводности на 15–30 %.

Поскольку масло является средой, отвечающей и за изоляцию, и за охлаждение трансформатора, его эксплуатационные характеристики могут быть улучшены за счет повышения электрической прочности, диэлектрической проницаемости масла и его способности передавать тепло от обмотки трансформатора к его оболочке за счет механизма конвекции. В последнее десятилетие диспергирование наночастиц в базовой жидкости рассматривается как способ модификации свойств жидкости с целью улучшения ее тепловых характеристик [12]. Такие растворы наночастиц в базовой жидкости, предложенные в статье [13], в литературе называются наножидкостями и характеризуются в основном материалом наночастиц, базовой жидкостью, объемной концентрацией наночастиц и наличием поверхностно-активного вещества.

В последнее время проводятся исследования по увеличению электрической прочности путем добавления наночастиц в минеральные масла, используемые в электрических трансформаторах. В работе [14] проведена оценка пробивного напряжения наножидкостей, состоящих из наночастиц TiO_2 и минерального масла с объемной концентрацией 0,075 %. Согласно полученным результатам, при

добавлении в минеральное масло наночастиц TiO_2 пробивное напряжение увеличилось с 67,9 до 80,9 кВ. Такое поведение объясняется в работе тем, что полупроводниковые частицы действуют как ловушки для электронов, вызывая их захват в среде и улучшая диэлектрические характеристики масла. В статье [15] авторы оценили электрическую прочность наножидкостей на основе растворов минерального масла и магнитных частиц железа диаметром около 10 нм. Для стабилизации наножидкости в раствор добавлялись поверхностно-активные вещества. Авторы наблюдали электрическую прочность, более чем в два раза превышающую значение, наблюдаемое для базовой жидкости. При приложении к трансформатору дополнительного внешнего магнитного поля было получено дополнительное увеличение прочности диэлектрика на 30 %. Однако в некоторых работах получены обратные результаты. Например, в статье [7] отмечено, что при увеличении концентрации наночастиц Al_2O_3 электрическая прочность уменьшается, при увеличении концентрации TiO_2 изначально демонстрируется рост электрической прочности при добавлении 2 % наночастиц, а при последующем увеличении концентрации демонстрируется спад; при концентрации в 5 % электрическая прочность оказалась ниже исходной, также при добавлении SiO_2 наблюдалось уменьшение электрической прочности.

Цель работы – выявление факторов, определяющих электрическую прочность жидкой изоляции с микровключениями.

1. Методика экспериментального исследования

Приготовление наножидкостей является первым, ключевым шагом в экспериментальных исследованиях с наножидкостями. Наножидкости – это не просто смеси жидкости и твердого тела. К ним предъявляются некоторые требования, например равномерность и стабильность суспензии, незначительная агломерация частиц, отсутствие химического изменения жидкости и т. д. Наножидкости производятся путем диспергирования твердых частиц нанометрового размера в базовых жидкостях, таких как вода, этиленгликоль, спирт, масла и т. д. При синтезе наножидкостей основной проблемой является агломерация.

Для получения наножидкостей в основном используются два метода: одностадийный и двухстадийный. В первом случае наночастицы получают и диспергируют в масле одновременно, то есть исключаются процессы сушки, хранения и транспортировки наночастиц, что позволяет минимизировать агломерацию и повысить стабильность дисперсии в масле [17]. Так, в серебряных наножидкостях на основе минерального масла, приготовленных одностадийным химическим методом путем разложения лактата кремния в масле, концентрация наночастиц серебра составляла 0,011 и 0,3 об%, причем наночастицы оставались хорошо диспергированными примерно в течение месяца [18]. Однако остатки исходных и промежуточных веществ в наножидкости, образующиеся в результате неполной реакции или стабилизации, могут ограничить применимость одностадийных методов [19].

В двухстадийных методах твердые наночастицы получают химическими или физическими методами, а затем диспергируют в масле-хозяине с помощью магнитного перемешивания, ультразвуковой обработки, перемешивания с высоким сдвигом или шарового размола. Эти методы более широко используются, чем одностадийные методы, из-за их низкой стоимости и широкого спектра наночастиц, с которыми они совместимы.

Для изучения того, как наноматериалы воздействуют на электрические свойства трансформаторного масла марки ГК, было использовано несколько проб наножидкостей.

1. ОУНТ – одностенные углеродные нанотрубки. Фирма OCSIAL синтезирует одностенные углеродные нанотрубки (SWCNT) нескольких видов, которые отличаются по составу: Tuball 01RW02 (ОУНТ 80 %, углерод графитизированный 5 % и железо 15 %), Tuball 01RW03 (ОУНТ 93 %, углерод графитизированный 6 % и железо 1 %). Отличие 01RW03 от 01RW02 состоит в том, что данные нанотрубки дополнительно очищаются от остатков металлического катализатора, который используется при производстве. Для наших опытов использовались ОУНТ Tuball 01RW03. Диаметр нанотрубки составлял $\approx 1,6 \pm 0,4$ нм, длина ≈ 5 мкм.

2. Нанооксид цинка. Чистота 98 %, остальное – цинк и сорбированные газы O_2 , Ar, N_2 . Размер частиц 20–40 нм.

3. Нанооксид титана. Чистота 99 %. Размер частиц 49 нм. Насыпная плотность 0,5–2 г/см³. Температура плавления 1843 градуса.

Перед добавлением углеродных нанотрубок и иных нановключений масло сушилось с использованием технического силикагеля и фильтровалось.

Первые эксперименты по приготовлению наножидкостей проводились с нанотрубками. Для приготовления проб было взято 400 мл трансформаторного масла марки ГК, к которому добавлялось заранее определенное количество нанотрубок. В экспериментах использовался ультразвуковой диспергатор, мощность которого составляла 1 кВт при диаметре излучателя 33 мм. Для определения оптимальных параметров диспергирования в подготовке исследуемой жидкости было применено несколько методик.

1. С использованием диспергатора 0,002 г углеродных нанотрубок распределялись непосредственно в 200 мл трансформаторного масла в течение 60 мин.

2. С использованием ультразвуковой ванны в спиртовом растворе объемом 50 мл распределялись 0,002 г углеродных нанотрубок в течение 45 мин. Далее полученная смесь приливалась к трансформаторному маслу объемом 200 мл и подвергалась ультразвуковой обработке с использованием диспергатора.

3. С использованием диспергатора 0,002 г углеродных нанотрубок подвергались ультразвуковой обработке в спиртовом растворе объемом 100 мл в течение 45 мин, далее обработанная смесь приливалась к 200 мл масла и диспергировалась на генераторе в течение 45 мин.

4. В этой методике производилось предварительное измельчение нанотрубок с помощью шаровой мельницы в течение времени активации 45 с. Далее готовили образец в соответствии с методикой, описанной в п. 3.

Исследование электрической прочности проводили на установке СКАТ-М100В с измерительной ячейкой объемом 400 мл и полусферическими высоковольтными электродами. В установке СКАТ-М100В расположен стол, на котором находится ячейка с наножидкостью; автоматически после пробоя стол несколько раз опускается вниз и поднимается вверх для удаления продуктов разложения из межэлектродного пространства. Значение зазора между электродами составляло 2,5 мм. Для очистки электродов от углеродных нанотрубок после каждой серии измерений использовался технический изопропиловый спирт. Затем в измерительную ячейку заливалось заранее подготовленное масло с определен-

ной концентрацией нанотрубок, и на нее подавалось напряжение частотой 50 Гц со скоростью нарастания напряжения 2 кВ/с, которая была определена экспериментально. Выдержка между сериями опытов была установлена 10 минут. Задержка между пробоями в каждой серии также была заранее исследована и составляла 5 минут.

2. Результаты

2.1. Измерение напряжения пробоя наножидкости, приготовленной по первой методике

Таблица 1

Напряжение пробоя при диспергировании непосредственно в масле

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	20,2	28,9	42,5	37,8	21,6	19,5	52,3	17,8	28,6
200	45,6	32,8	18,2	68,9	32,5	16,4	27,6	36,4	78,2
300	34,5	45,6	19,7	11,3	14,5	28,7	52,9	34,6	38,7
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	35,9	28,7	18,8	28,9	60,8	34,5	38,9	70,5	28,2
200	19,2	28,6	29,5	61,3	50,8	18,7	23,6	52,1	15,4
300	23,6	67,9	14,9	17,2	9,0	23,4	25,6	38,9	42,1
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее			Среднее отклонение			
100	15,8	45,3	33,75			14,76			
200	19,8	22	34,57			18,5			
300	40,1	18,7	30,09			15,23			

Исходя из табл. 1 можно сделать вывод о том, что диспергирование в масле не дает результата. Погрешность эксперимента составляет порядка 50 %, что не дает никакого представления о влиянии концентрации нанотрубок на минеральное масло.

2.2. Измерение напряжения пробоя наножидкости, приготовленной по второй методике

Исходя из полученных значений напрашивается вывод о том, что при добавлении нанотрубок, во-первых, снижается электрическая прочность, во-вторых, при росте концентрации УНТ происходит более значительное снижение электрической прочности. Кроме того, смесь оказалась нестабильной. Углеродные нанотрубки без поддержания разбитого состояния достаточно быстро слипаются, а в течение дня возвращаются в исходное состояние. Подчеркнем, что в этой серии масло не менялось от пробоя к пробоя, просто в малоконцентрированную жидкость после 20 пробоев добавляли более концентрированную в таком количестве, чтобы получилась требуемая концентрация.

Исходя из этой серии опытов было выдвинуто предположение о «старении масла» в связи с большим количеством последовательных пробоев без замены исходного масла. По данной причине было принято решение о подготовке новой

пробы и разового добавления в нее максимальной концентрации 500 мкг/л, а не постепенного, как в прошлой серии опытов.

Таблица 2

Напряжение пробоя при диспергировании в ультразвуковой ванне

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	33,6	37,2	32,3	27,6	26,2	32,1	36,6	34,8	32,7
200	33,4	29,2	31,5	27	31,7	28,9	29,8	32,8	30,5
300	28,7	25,3	24,8	18,4	30,1	25,3	19,6	22,6	30,8
400	26,3	25,4	22,6	28,7	24,6	28,8	10	28,6	26,2
500	23,1	25,2	21,2	18,2	27,7	25,8	26,3	21,7	20,6
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	37,9	34,5	12	13	14	15	16	17	18
200	31,3	30,3	32,7	33,8	29,5	35,1	28,4	32,8	29,6
300	30,1	19,3	28,9	32,6	29,4	27,5	33,9	30,8	32,6
400	28	28	18,9	26,5	21,6	23,9	32,8	24,6	19,9
500	24,2	18,9	28,2	19,9	26,5	24,8	26,7	28,1	23,5
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее			Среднее отклонение			
100	32,1	34,7	32,71			3,16			
200	34,8	34,5	31,07			2,23			
300	28,3	24,5	24,8			4,35			
400	24,8	21,3	25,05			4,35			
500	22,8	20,5	22,54			3,38			

Таблица 3

Напряжение пробоя при разовом добавлении максимальной концентрации

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
500	17,6	26,1	27,1	15,6	24,2	24,9	16,8	16	26,3
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	21,4	19,8	25,4	26,4	17,9	22,4	23,9	15,9	18,2
	19	20	Среднее			Среднее отклонение			
	25,1	20,9	21,59			4,06			

Отталкиваясь от полученных значений (табл. 2, 3) можно сделать вывод о том, что электрическая прочность осталась прежней; значит, количество предыдущих пробоев не оказывало влияния.

2.3. Измерение напряжения пробоя наножидкости, приготовленной по третьей методике

Полученные значения (табл. 4) схожи с теми, которые были получены ранее, при диспергировании в ультразвуковой ванне (см. табл. 2). Преимуществом данного метода является то, что для поддержания разбитого состояния наножидкости достаточно было использовать магнитную мешалку, т. к. частицы при обра-

ботке на ультразвуковом генераторе распадаются на более мелкие по сравнению с обработкой в ультразвуковой ванне.

Таблица 4

Напряжение пробоя при обработке на ультразвуковом генераторе

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	33,4	36,4	27,8	29,1	34,9	38,8	37,5	36,6	31,3
200	33,8	32,5	33,9	33,1	31,6	34,2	27,8	30,7	35,9
300	26,1	33,5	34,1	33,1	36,8	34,7	30,5	29,5	31,3
400	32,4	30,8	21,8	25,5	30,9	31,8	25,9	26,4	28,9
500	22,1	28,0	29,1	34,7	16,4	25,6	26,3	22,3	28,7
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	36,2	37,2	38,3	29,8	35,8	31,8	28,8	35,6	36,8
200	33,6	30,6	35,2	33,5	34,7	31,3	34,2	33,2	33,1
300	34,7	32,9	33,9	30,7	34,9	32,1	30,9	34,3	27,4
400	20,9	31,8	26,8	29,1	25,7	30,7	29,3	31,1	28,6
500	21,9	19,8	26,9	23,8	27,3	15,9	25,2	21,2	18,2
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее			Среднее отклонение			
100	29,2	29,8	33,75			3,66			
200	33,5	31,6	32,9			1,86			
300	28,9	32,8	32,15			2,72			
400	27,8	23,8	28			3,39			
500	27,7	25,8	24,34			4,67			

2.4. Измерение напряжения пробоя наножидкости, приготовленной по четвертой методике

Используя данную методику, получили значения (табл. 5), схожие с полученными ранее; следовательно, можно сделать вывод о том, что дополнительная обработка в виде измельчения нанотрубок не требуется.

Таблица 5

Напряжение пробоя после активации измельчения нанотрубок

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	33	35,2	35	29	31,9	29,5	36,3	29,8	34,3
200	29,9	31,9	33,2	31,3	25,1	36,5	30,1	30,8	24,8
300	25,8	15,2	27,5	27,9	33,6	33,3	35,3	26,5	34,0
400	22,8	22,8	28,5	31,3	24,2	27,4	26,9	25,8	27
500	16,8	22,5	17,0	28,3	25,4	27,1	17,6	24,7	29,2
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	30	37,8	26,0	32,2	36,0	35,4	31,5	29,6	36,8
200	32,5	30,6	31,4	26,2	25,9	26,6	30,7	31,4	33,8
300	26,8	33,7	15,0	32,4	31,1	24,9	24,3	30,4	26,0
400	30,9	28,2	29,1	28,3	23,2	31,2	27,5	28,0	25,0
500	28,0	27,6	28,3	25,7	29,0	27,8	28,5	28,0	27,6

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
100	34,5	36,9	34,7	29,7	28,2	34,7	35,7	35,1	33,1
200	29,4	22,2	29,5	34,2	27,4	26,8	24,2	30,1	35,6
300	31,1	30,1	20,0	25,3	30,4	31,9	33,3	27,8	27,1
400	24,5	31,7	28,9	29,0	30,9	29,9	21,2	27,2	29,4
500	21,8	21,4	29,8	27,6	27,6	19,2	24,2	27,7	27,0
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	28	29	30	Среднее		Среднее отклонение			
100	34,1	31,4	36,2	33,12		3,04			
200	34,8	33,8	29,2	29,99		3,6			
300	30,8	32,2	30,2	28,46		5,06			
400	22,8	32,4	27,7	27,42		3,02			
500	27,1	16,6	25,1	25,24		4,17			

2.5. Обсуждение результатов

По результатам измерений, представленным в п. 3.1, было установлено, что диспергирование непосредственно в масле не позволяет достичь ожидаемых результатов. Агломераты углеродных нанотрубок диспергируются не в полной степени, что негативно влияет на результаты измерений; в результате этого среднее отклонение имеет значения 43,7 % при 100 мкг/л, 53,5 % при 200 мкг/л и 50,6 % при 300 мкг/л.

По результатам измерений, представленным в п. 3.2, было выявлено, что диспергирование в спирте в ультразвуковой ванне дает результат, но эффект является кратковременным. Углеродные нанотрубки без поддержания разбитого состояния достаточно быстро слипаются, а в течение дня возвращаются в исходное состояние. В целом методика, основанная на поэтапном диспергировании, себя оправдала, так как среднее отклонение составило порядка 13,28 %.

По результатам измерений, представленным в п. 3.3, было получено наиболее стабильное значение электрической прочности, а также нанотрубки более качественно расщеплялись и процесс агломерации происходил дольше. Среднее отклонение составило 11,04 %.

В результате использования методики, описанной в п. 3.4, были получены идентичные значения, поэтому дополнительно измельчать нанотрубки перед подготовкой смеси не требуется.

Как видно, напряжение пробоя с добавлением УНТ всегда оказывалось меньше исходного. Вероятно, это связано с формой частиц – имеют нитевидную форму, диаметр нанотрубки $\approx 1,6 \pm 0,4$ нм, длина ≈ 5 мкм. Такие размеры неизбежно приводят к агломерации, а также к локальному усилению поля у кончиков, поэтому принято решение о проведении дополнительных экспериментов с наночастицами более шарообразной формы.

3. Эксперименты с добавлением наноксидов

3.1. Наноксид титана (TiO₂)

Условия проведения измерения: к 200 мл трансформаторного масла приливался спиртовой раствор, содержащий 0,029 г наноксид титана в 100 мл объема спирта, предварительно диспергированный на ультразвуковом генераторе в те-

чение 45 минут. Далее модифицированная смесь подвергалась ультразвуковой обработке на диспергаторе в течение 45 минут (табл. 6).

Таблица 6

Напряжение пробоя при добавлении наноксид титана

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
75	62,3	59,1	53,9	52,7	51,3	61,3	65,5	50,8	65,7
150	60,1	63,1	59,2	52,6	51,9	58,2	64,3	71,9	51,2
225	54,5	61,3	54,2	57,5	56,1	60,1	58	57,3	52,3
300	58,3	59,1	55,5	50,1	52,3	49,1	57,6	62,3	57,5
450	56,5	54,3	60,2	55,3	59,1	56,7	59,9	56,5	56,3
600	51,4	52,5	56,1	58,9	56,8	53,8	45,8	60,1	52,5
750	50,5	56,2	52,3	54,6	55,7	59,1	44	56,9	62,9
1500	40,1	42,6	43,5	46,5	48,6	41,9	44,4	38,3	38,8
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
75	67,7	56,2	62,9	59,8	52,1	60,3	54,8	59,6	64,8
150	60,5	55,7	57,9	58,9	57,6	60,1	62,3	58,7	60,1
225	48,9	50,1	51,3	54,6	52,1	51,3	54,3	55,6	54,9
300	51,1	57,3	43,3	52,1	53,4	48,7	52,3	56,4	50,2
450	60,7	60,6	61,3	57,6	49,1	60,2	55	54,6	52,7
600	55,3	53,5	49,6	45,8	52,1	54,6	58,1	46,8	49,7
750	42	46,7	55,9	51,2	52,6	48,7	49,6	59,6	51,4
1500	44,9	45,5	62,9	59,8	52,1	60,3	54,8	59,6	64,8
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее		Среднее отклонение				
75	60,1	62,3	59,16		5,16				
150	57,3	52,1	58,68		4,83				
225	60,1	58,7	55,16		3,5				
300	47,9	45,8	53,01		4,9				
450	51,9	57,9	56,82		3,29				
600	52,1	53,6	52,95		4,06				
750	54,6	48,9	52,67		5,25				
1500	38,7	42,4	42,76		3,59				

3.2. Наноксид цинка (ZnO)

Условия проведения измерения: к 200 мл трансформаторного масла приливался спиртовой раствор, содержащий 0,02 г наноксид цинка в 100 мл объема спирта, предварительно диспергированный на ультразвуковом генераторе в течение 45 минут. Далее модифицированная смесь подвергалась ультразвуковой обработке, как в п. 3.1.

По результатам измерений, представленным в п. 3.2, было замечено, что начальное масло имеет значения электрической прочности на 15 % выше, чем в прошлых измерениях. Связано это с тем, что перед данными замерами мы производили дополнительную подготовку масла, а именно фильтровали через двойной слой обеззоленного фильтра класса «синяя лента» и слой силикагеля; фильтрация производилась по 2 раза на каждый образец пробы (табл. 7).

Таблица 7

Напряжение пробоя при добавлении нанooksида цинка

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Чистое масло	66,7	65,1	78,4	68,6	60,9	69,9	65,3	74,7	69,3
100	76,1	74,2	66,5	68,9	62,2	68,9	73,3	65,8	76,5
200	71,1	68,8	69,5	58,3	71,4	77,9	71,7	72,3	71,9
300	53,7	66,1	69,9	74	62,5	61,9	68,6	70,9	72,5
500	64,7	70,7	63,3	60,5	71,3	73,3	65,1	62,3	70,7
700	62,1	56,9	55,1	56,3	65,1	56,3	65,1	56,7	65,1
900	48,9	53,9	71,9	62,7	67,7	65,5	60,1	57,8	64,1
1200	67,9	56,9	63,5	71,5	65,3	62,7	63,4	72,3	64,9
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Чистое масло	72,9	80	74,5	75,3	77,6	73,9	74,6	75,8	83,7
100	77	74,1	73,4	76,5	68,7	81,8	77,3	77,7	79,5
200	75,5	72,7	67,9	65,8	70,1	73,6	64,9	68,6	70,5
300	54,4	68,1	67,5	65,8	64,5	70,5	64,2	63,9	70,9
500	65,5	67,9	60,5	67,8	65,4	72,6	68,1	63,2	69,1
700	65,7	58,8	63,2	58,9	62,3	60,5	62,3	71,6	58,7
900	55,8	57,1	49,1	59,4	49,7	51,9	53,7	64,5	49,8
1200	52,1	65,9	65,1	64,2	58,7	59,6	54,3	52,8	59,4
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее		Среднее отклонение				
Чистое масло	68,9	75,6	72,58		5,6				
100	59,8	75,4	72,68		5,86				
200	69,7	61,5	69,85		4,51				
300	62,1	64,3	65,81		5,35				
500	67,3	66,5	66,79		3,78				
700	54,6	60,4	60,78		4,37				
900	60,8	58,7	58,15		6,63				
1200	68,1	49,1	59,51		6,4				

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Электрическая прочность наномасла на основе углеродных нанотрубок значительно меньше электрической прочности наномасла на основе оксидов цинка и титана. На наш взгляд, это связано с формой наночастиц.
2. С ростом концентрации электрическая прочность всех наножидкостей уменьшается.
3. При малых концентрациях значения электрической прочности примерно соответствуют значениям электрической прочности чистой жидкости.
4. Технология приготовления наножидкости оказывает сильное влияние на ее напряжение пробоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Potao S., Wenxia S., Dingfei Z., Qiulin C., Lian Y., Jiaqi C. Effects of impulse waveform parameters on the breakdown characteristics of nano-TiO₂ modified transformer oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25. No. 5. Pp. 1651–1659.
2. Gaurav S., Hemantkumar A. Thermal conductivity enhancement of transformer oil using functionalized nanodiamonds // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22. No. 4. Pp. 2185–2190.
3. Abid M.A., Khan I., Ullah Z., Ullah K., Haider A., Ali S.M. Dielectric and Thermal Performance Up-Gradation of Transformer Oil Using Valuable NanoParticles // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 153509–153518.
4. Swati K., Sarathi R., Yadav K.S., Taylor N., Edin H. Corona discharge activity in nanoparticle dispersed transformer oil S. K. under composite voltages // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25. No. 5. Pp. 1731–1738.
5. Potao S., Wenxia S., Xiongwei J., Dingfei Z., Jiahui H., Qiulin C. Failure of nano-modified oil impregnated paper under repeated impulse voltage: Effects of TiO₂ nanoparticles on space charge characteristics // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25. No. 8. Pp. 2103–2111.
6. Dhar P., Katiyar A., Maganti L.S., Pattamatta A., Das S. Superior dielectric breakdown strength of graphene and carbon nanotube infused nano-oils // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2016. Vol. 23. No. 2. Pp. 943–956.
7. Yuzhen L., Chengrong L. A Review on Properties, Opportunities, and Challenges of Transformer Oil-Based Nanofluids Muhammad Rafiq // Journal of Nanomaterial. 2016. Vol. 2016. Pp. 23–47.
8. ГОСТ 6581-75 Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний.
9. Bartley W.H. Investigating transformer failure // In Proceedings of the 5th Weidmann-ACTI Annual Technical Conference on New Diagnostic Concepts for Better Asset Management, 2006. Pp. 1–14. <http://www.sciepub.com/reference/179122> (accessed October 10, 2023).
10. Rafiq M. Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications // Transformer Life Extension. 2020. Vol. 25. Pp. 36–41. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7503315/> (accessed October 10, 2023).
11. Chiesa M., Das K. Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media // Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects, 2009. Vol. 335. Pp. 88–97. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775708007322> (accessed October 10, 2023).
12. Rouse T.O. Mineral insulating oil in transformers // IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998. Vol. 14. Pp. 6–16. <https://ieeexplore.ieee.org/document/675572> (accessed October 10, 2023).
13. Рудяк В.Я., Минакова А.В., Пряжников М.И., Гузей Д.В. Измерение теплопроводности и коэффициента теплоотдачи наножидкостей с одностенными нанотрубками // Теплофизика высоких температур. 2022. № 5. С. 692–700.
14. Choi S., Eastman J.A. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles // ASME, International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco, CA, 1995.
15. Du Y., Lv Y., Li C., Chen M., Zhong Y., Zhou J. Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012. Pp. 770–776.
16. Lee J., Kim W. Experimental study of dielectric breakdown voltage of insulating oil mixed with magnetic nanoparticles // Phys. Procedia. 2012. Vol. 32. Pp. 327–334.
17. Nemati A. Recent Advances in Nanofluids Based on Transformer Oil: Preparation and Electrical Insulation Properties // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2021. Vol. 28. Pp. 702–711. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6882597> (accessed October 10, 2023).
18. Bonnemant H. Monodisperse copper and silver-nanocolloids suitable for heat-conductive fluids // Appl. Organomet. Chem. 2005. Vol. 19. Pp. 768–773. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aoc.889> (accessed October 10, 2023).

19. *Yu W., Xie H.Q.* A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications // Journal of Nanomaterial. 2011. Vol. 2012. <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/435873/> (accessed October 10, 2023).
20. *Ржевская С.П.* Электрические материалы. Диэлектрики. Минск: БИТУ, 2009. 142 с.
21. *Николаев М.Ю., Мальгин Г.В., Щекочихин А.В., Шкаруба М.В.* Электротехнические и конструкционные материалы. Нижневартонск: НВГУ, 2022. 167 с.
22. *Воробьев Г.А.* Диэлектрические свойства электроизоляционных материалов. Томск: Томск. ун-т, 1984. С. 69–73.
23. ГОСТ Р 56738-2015 Трансформаторы силовые. Требования и методы испытания электрической прочности.
24. *Барбашова Г.А., Шомко В.В.* Влияние цикличности ввода электрической энергии в канал подводного искрового разряда // Инженерия поверхности и прикладная электрохимия. 2007. Т. 43. № 2. С. 43–49.
25. *Хренников А.Ю., Батяев Р.Ю., Мажурин Ю.В.* Аварийность высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения в электрических сетях 110–750 кВ и мероприятия по ее снижению // Электро. Электроника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2011. № 6. С. 44–46.
26. *Кизеветов Д.В., Резник А.С., Журавлева Н.М., Литвинов Д.В.* Влияние концентрации компонентов смеси диэлектрических жидкостей для силовых трансформаторов на электрическое сопротивление и оптические характеристики // Глобальная энергия. 2020. № 3. С. 5–19.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2023 г.

INFLUENCE OF NANO-OIL PREPARATION CONDITIONS ON ITS ELECTRICAL STRENGTH

V.A. Loskutov, Y.G. Prokopenko, A.V. Rydel, L.P. Goreva*

Novosibirsk State Technical University
20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

E-mail: blackline05@yandex.ru, yakovprokopenko@mail.ru, ridel@corp.nstu.ru, goreva@corp.nstu.ru

Abstract. *This study presents the results of experiments aimed at determining the breakdown voltage of liquids containing carbon nanotubes and other microinclusions, which were dispersed in mineral insulating oil used in electrical transformers. The liquid was obtained by various methods with the mandatory use of ultrasonic dispersant. The electrical strength of the carbon nanotube-based nano-oil was found to be significantly less than the electrical strength of the zinc and titanium nano-oxide-based nano-oil. At low concentrations the values of electrical strength approximately correspond to the values of electrical strength of pure liquid, but with increasing concentration the electrical strength of all nanofluids decreases. It is shown that the nanofluid preparation technology has a strong influence on its breakdown voltage.*

Keywords: *Transformer oil, transformer, electrical strength, dispersion, carbon nanotubes, titanium nanooxide, zinc nanooxide, microinclusions.*

REFERENCES

1. Potao S., Wenxia S., Dingfei Z., Qiulin C., Lian Y., Jiaqi C. Effects of impulse waveform parameters on the breakdown characteristics of nano-TiO₂ modified transformer oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25. No. 5. Pp. 1651–1659.
2. Gaurav S., Hemantkumar A. Thermal conductivity enhancement of transformer oil using functionalized nanodiamonds // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22. No. 4. Pp. 2185–2190.
3. Abid M.A., Khan I., Ullah Z., Ullah K., Haider A., Ali S.M. Dielectric and Thermal Performance Up-Gradation of Transformer Oil Using Valuable NanoParticles // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 153509–153518.
4. Swati K., Sarathi R., Yadav K.S., Taylor N., Edin H. Corona discharge activity in nanoparticle dispersed transformer oil S. K. under composite voltages // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25. No. 5. Pp. 1731–1738.
5. Potao S., Wenxia S., Xiongwei J., Dingfei Z., Jiahui H., Qiulin C. Failure of nano-modified oil impregnated paper under repeated impulse voltage: Effects of TiO₂ nanoparticles on space charge characteristics // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25. No. 8. Pp. 2103–2111.
6. Dhar P., Katiyar A., Maganti L.S., Pattamatta A., Das S. Superior dielectric breakdown strength of graphene and carbon nanotube infused nano-oils // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2016. Vol. 23. No. 2. Pp. 943–956.
7. Yuzhen L., Chengrong L. A Review on Properties, Opportunities, and Challenges of Transformer Oil-Based Nanofluids Muhammad Rafiq // Journal of Nanomaterial. 2016. Vol. 2016. Pp. 23–47.

*Viktor A. Loskutov, Postgraduate Student.

Yakov G. Prokopenko, Student.

Alexander V. Rydel, (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Ludmila P. Goreva, (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

8. GOST 6581-75 Materialy elektroizolyacionnye zhidkie. Metody elektricheskikh ispytaniy [Electrically insulating liquid materials. Methods of electrical tests]. (In Russian).
9. *Bartley W.H.* Investigating transformer failure // In Proceedings of the 5th Weidmann-ACTI Annual Technical Conference on New Diagnostic Concepts for Better Asset Management, 2006. Pp. 1–14. <http://www.sciepub.com/reference/179122> (accessed October 10, 2023).
10. *Rafiq M.* Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications // Transformer Life Extension. 2020. Vol. 25. Pp. 36–41. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7503315/> (accessed October 10, 2023).
11. *Chiesa M., Das K.* Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media // Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects, 2009. Vol. 335. Pp. 88–97. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775708007322> (accessed October 10, 2023).
12. *Rouse T.O.* Mineral insulating oil in transformers // IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998. Vol. 14. Pp. 6–16. <https://ieeexplore.ieee.org/document/675572> (accessed October 10, 2023).
13. *Rudiyak V.Ya., Minakova A.V., Pryazhnikov M.I., Guzey D.V.* Izmerenie teploprovodnosti i koefitsienta teplootdachi nanozhdikostej s odnostennymi nanotrubkami [Measurement of thermal conductivity and heat transfer coefficient of nanotubes with single-walled nanotubes] // Thermophysics of high temperatures. 2022. No. 5. Pp. 692–700. (in Russian).
14. *Choi S., Eastman J.A.* Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles // ASME, International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco, CA, 1995.
15. *Du Y., Lv Y., Li C., Chen M., Zhong Y., Zhou J.* Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012. Pp. 770–776.
16. *Lee J., Kim W.* Experimental study of dielectric breakdown voltage of insulating oil mixed with magnetic nanoparticles // Phys. Procedia. 2012. Vol. 32. Pp. 327–334.
17. *Nemati A.* Recent Advances in Nanofluids Based on Transformer Oil: Preparation and Electrical Insulation Properties // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2021. Vol. 28. Pp. 702–711. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6882597> (accessed October 10, 2023).
18. *Bonnemann H.* Monodisperse copper and silver-nanocolloids suitable for heat-conductive fluids // Appl. Organomet. Chem. 2005. Vol. 19. Pp. 768–773. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aoc.889> (accessed October 10, 2023).
19. *Yu W., Xie H.Q.* A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications // Journal of Nanomaterial. 2011. Vol. 2012. <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/435873/> (accessed October 10, 2023).
20. *Rzhevskaya S.P.* Elektricheskie materialy. Dielektriki [Electrical Materials. Dielectrics]. Minsk: BITU, 2009. 142 p. (in Russian).
21. *Nikolaev M.Yu., Malgin G.V., Shchekochikhin A.V., Shkaruba M.V.* Elektrotekhnicheskie i konstrukcionnye materialy [Electrotechnical and structural materials]. Nizhnevartovsk: NVGU, 2022. 167 p. (in Russian).
22. *Vorobyev G.A.* Dielektricheskie svoystva elektroizolyacionnykh materialov [Dielectric properties of electrical insulating materials]. Tomsk: Tomsk University Publishing House, 1984. Pp. 69–73. (in Russian).
23. GOST P 56738-2015 Transformatory silovye. Trebovaniya i metody ispytaniya elektricheskoy prochnosti [Power transformers. Requirements and test methods for electrical strength]. (in Russian).
24. *Barbashova G.A., Shomko V.B.* Vliyanie ciklichnosti vvoda elektricheskoy energii v kanal podvodnogo iskrovogo razryada [Influence of the electric energy input cycling into the underwater spark discharge channel] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2007. Vol. 43. № 2. Pp. 43–49. (in Russian).
25. *Hrennikov A.Yu., Batyaev R.Yu., Mazhurin Yu.V.* Avarijnost' vysokovol'tnykh izmeritel'nykh transformatorov toka i napryazheniya v elektricheskikh setyah 110-750 kV i meropriyatiya po eyo snizheniyu [Accident rate of the high-voltage measuring current and voltage transformers in the 110-750 kV electrical networks and measures to reduce it] // Elektro. Elektronika, Elektroenergetika, Elektrotechnical Industry. 2011. No. 6. Pp. 44–46 (in Russian).

26. *Kizevetov D.V., Reznik A.S., Zhuravleva N.M., Litvinov D.V.* Vliyanie koncentracii komponentov smesi dielektricheskikh zhidkostej dlya silovykh transformatorov na elektricheskoe soprotivlenie i opticheskie harakteristiki [Influence of dielectric fluid mixture components concentration for power transformers on electrical resistance and optical characteristics] // *Global Energy*. 2020. No. 3. Pp. 5–19. (in Russian).

УДК 621.314.572

ВЫБОР ВЫХОДНОГО ИНВЕРТОРА ДЛЯ МИКРОГРИД***Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, И.И. Артюхов, М.Е. Мамоничев,
П.А. Ерюшев, Р.В. Кожанов****

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

E-mail: mee85@inbox.ru, mityashinnp@mail.ru, ivart54@mail.ru, mamonichev@gmail.com,
eryushev.pavel@mail.ru, ljubimch@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача выбора выходного инвертора микрогрид при неопределенности информации об условиях эксплуатации. В качестве источников неопределенностей информации об условиях эксплуатации рассматриваются такие факторы, как возможности увеличения нагрузки в местности, для которой проектируется микрогрид, перспективы ее интегрирования в локальную систему электроснабжения на основе действующих в данном регионе микрогрид, а также возможные изменения в элементной базе в связи с импортозамещением. Разработаны система критериев и методика оптимального выбора, основанная на сочетании подходов многовекторной оптимизации и метода анализа иерархий. В качестве векторных критериев выбраны критерий качества генерируемой энергии, критерий надежного функционирования в условиях неопределенности информации и критерий экономических показателей. Общее число скалярных критериев, являющихся компонентами указанных векторных критериев, равно семи. На первом этапе выбора используется алгоритм экспертной оценки важности векторных критериев и их скалярных компонентов, а также значений этих критериев для сравниваемых альтернатив по методу анализа иерархий. На втором этапе выбора производится ранжирование рассматриваемых инверторов по глобальному критерию, рассчитываемому на основании результатов первого этапа. Методика продемонстрирована на выборе между тремя известными схемами автономных инверторов: инвертором напряжения с ШИМ-формированием выходной кривой, инвертором тока с изменяемой структурой и групповым многоуровневым инвертором на основе универсального источника уровней при их эксплуатации в автономном или интегрированном в систему других микрогрид режимах. Описанная методика выбора может

* Екатерина Евгеньевна Миргородская, доцент кафедры «Системотехника и управление в технических системах», к.т.н., доцент.

Никита Петрович Митяшин, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах» д.т.н., профессор.

Иван Иванович Артюхов, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника», д.т.н., профессор.

Михаил Евгеньевич Мамоничев, аспирант кафедры «Системотехника и управление в технических системах».

Павел Александрович Ерюшев, аспирант кафедры «Системотехника и управление в технических системах».

Роман Вячеславович Кожанов, аспирант кафедры «Системотехника и управление в технических системах».

быть использована при выборе других устройств преобразовательного оборудования микрогрид.

Ключевые слова: автономный инвертор, микрогрид, критерии, многовекторная оптимизация, скаляризация, метод анализа иерархий, качество электроэнергии, гибкость оборудования.

Введение

В настоящее время в качестве альтернативы традиционным источникам энергии применяют электростанции, получающие первичную энергию разной физической природы, и прежде всего на основе солнечных батарей, микротурбин и ветрогенераторов. Такие электростанции, их нагрузку и связывающие их линии электропередачи рассматривают как гибридные микрогрид (МГ) [1, 2].

Энергия, генерируемая первичными источниками МГ, не обладает стабильными параметрами. Поэтому неотъемлемой частью МГ является преобразовательное оборудование, обеспечивающее качество генерируемой энергии, требуемое государственным стандартом [3].

Постановка задачи

На сегодняшний день преобразовательное оборудование, применяемое в существующих МГ, фиксировано и в целом мало отличается для разных МГ. Однако развитие преобразовательной схемотехники, изменения в элементной базе в связи с импортозамещением не исключают разработки новых схемных решений и принципов построения преобразователей. Это связано также с развитием систем критериев выбора преобразователей и методов принятия решений. При этом существенное значение приобретает учет неопределенностей, имеющих место при проектировании и эксплуатации преобразовательного оборудования.

Конечным звеном преобразовательной цепочки МГ является выходной инвертор. Выбор его схемы является важным этапом проектирования МГ, что обусловлено определяющей ролью вида инвертора, влияющего как на качество выходной электроэнергии и выбор предшествующего ему в цепочке преобразования оборудования, так и на возможность и характер взаимодействия с нагрузкой и другими МГ.

Решению некоторых вопросов, связанных с проблемой выбора схемы инвертора для МГ, и посвящена настоящая работа.

Выбор альтернативных схем инверторов

Для выбора инвертора рассмотрим три варианта схем: инвертор напряжения с высокочастотной модуляцией (I_1) [4], двухмостовой инвертор тока на тиристорах с управляемой батареей коммутирующих конденсаторов и тиристорно-реакторным компенсатором (I_2), описанный подробно в [5], и групповой многоуровневый инвертор на основе универсального источника уровней (I_3), представленный в [6].

Такой подбор схем инверторов определен тем, что каждый из указанных преобразователей является типичным представителем одного из трех основных классов автономных инверторов: автономных инверторов напряжения, автономных инверторов тока и многоуровневых инверторов. Остальные инверторы ука-

занных классов не имеют заметных преимуществ перед выбранными представителями.

Этапы процесса выбора

Всякий выбор оборудования фактически сводится к трем этапам. На первом этапе необходимо определить множество критериев, оценивающих оборудование с точки зрения его соответствия целям операции. Сложность целей, свойств оборудования и условий его эксплуатации предопределяет многокритериальность (в другой терминологии – векторность) реальных задач выбора.

Второй этап связан с выбором метода компромисса между критериями, поскольку некоторые из них могут выставлять противоречивые требования к оборудованию. Фиксация метода компромисса фактически определяется системой предпочтений экспертов и лиц, принимающих решения. По этой причине методикой конкретного выбора целесообразно считать процедуру компромисса, фиксированного на втором этапе.

На третьем этапе производится непосредственный выбор с помощью процедур, фиксированных на втором этапе.

Выбор критериев для определения выходного инвертора МГ

Качество электроэнергии в конечном счете определяется всеми звеньями цепочки преобразователей энергии МГ, начинающейся от первичного источника энергии (солнечной батареи, ветрогенератора, дизельного генератора, аккумулятора и пр.). Конечным звеном этой цепочки является инвертор, генерирующий переменный ток, необходимый потребителю.

Множество критериев Ψ , определяющих выбор инверторов, целесообразно разделить на три подмножества. Каждое подмножество должно включать критерии, большее значение которых способствует выполнению основных требований, предъявляемых к функционированию МГ. Это требования по качеству генерируемой электроэнергии, по способности обеспечить надежную эксплуатацию в условиях неопределенности и по экономической эффективности. Такое разделение множества Ψ соответствует методологии многовекторной оптимизации [7], в соответствии с которой каждому подмножеству сопоставляется векторный критерий. Компонентами каждого векторного критерия являются критерии, входящие в соответствующие подмножества.

Целесообразность применения такого метода оптимизации следует из возникающей возможности оценки выполнения требований по каждому векторному критерию в отдельности, а затем и глобальной оценки альтернатив с учетом относительной важности векторных критериев.

В первое подмножество Φ_1 включим два критерия, являющиеся показателями качества генерируемой инвертором электроэнергии. Тогда векторный критерий Φ_1 будет иметь два скалярных компонента ϕ_{11} и ϕ_{12} .

Первый критерий ϕ_{11} соответствует требованиям к стабильности величины выходного напряжения МГ по точности и быстродействию. Стабильность напряжения определяется как внешней характеристикой выходного инвертора, так и способностями предшествующих ему в преобразовательной цепочке устройств к регулированию и стабилизации режимов передачи параметров электроэнергии.

Второй критерий рассматриваемого подмножества ϕ_{12} оценивает качество кривой генерируемого напряжения. Этот критерий в значительной степени опре-

деляется выбором типа инвертора. При этом способы получения требуемого качества кривой для большинства инверторов тесно связаны с методами регулирования величины выходного напряжения, что следует учитывать при их оценке по этим критериям.

Во второе подмножество критериев Φ_2 введем те критерии, которые оценивают способность обеспечить надежное электроснабжение при существенных изменениях условий функционирования. Таким образом, соответствующий векторный критерий имеет три скалярные компоненты φ_{21} , φ_{22} , φ_{23} .

Первый критерий этой группы φ_{21} характеризует структурную гибкость инвертора, позволяющую наращивать мощность МГ при развитии нагрузки.

Второй критерий φ_{22} оценивает способность выходного инвертора МГ к интегрированию с другими генерирующими станциями, и прежде всего с МГ того же типа.

Третий критерий группы φ_{23} характеризует надежность преобразователей МГ. Включение этого критерия связано со следующими соображениями. Особенностью надежности как критерия при выборе оборудования является то, что значения показателей, которые можно использовать для этой цели, основываются на статистических данных, получаемых в результате длительных или многочисленных испытаний, и подтверждаются многолетними практическими наблюдениями. Таким образом, использование нового вида комплектующих и оборудования всегда связано с риском их недостаточной надежности и, как следствие, со снижением качества соответствующих производственных процессов и даже возникновению аварийных ситуаций. В настоящее время в связи с необходимостью форсированного импортозамещения вынужденное применение комплектующих изделий, не прошедших достаточного апробирования, может иметь место. Таким образом, критерий φ_{23} оценивает инвертор с точки зрения критичности к применению импортозамещающихся комплектующих.

В третье подмножество критериев Φ_3 включены критерии экономического характера φ_{31} и φ_{32} , оценивающие соответственно стоимость инвертора и потери энергии в нем при преобразовании энергии.

Скаляризация как метод компромисса между критериями

Среди методик компромисса при решении многокритериальных задач выбора можно выделить большую группу процедур, сводящих многокритериальную задачу к однокритериальной, т. е. к скаляризации.

Методики этой группы сводятся к еще одному выбору, в результате которого каждому критерию присваивается некоторый коэффициент важности (или ценности) данного критерия в достижении целей операции.

Коэффициенты важности критериев выбираются из отрезка $[0, 1]$, причем более важные критерии получают большие значения. Назначения этих коэффициентов основываются на субъективной оценке экспертом степени важности соответствующего критерия.

Большинство процедур скаляризации требует нормализации критериев, т. е. перехода к новой системе критериев, в которой каждому критерию первоначального набора ставится в соответствие числовой критерий, принимающий значения от 0 до 1. При этом величина нового критерия получает тем большее значение, чем лучше оцениваемая альтернатива удовлетворяет соответствующему критерию исходного набора.

Для задач, в которых критерии исходного набора имеют числовые значения, нормализация сводится к линейному преобразованию [8].

После нормализации значений критериев для всех альтернатив и назначения коэффициентов важности составляется выражение единственного критерия φ

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot f_i(x), \quad (1)$$

где x – оцениваемая альтернатива; ρ_i – коэффициент важности i -го критерия; $f_i(x)$ – значение i -го нормализованного критерия для альтернативы x .

Нормализация требует, чтобы выполнялось следующее равенство:

$$\sum_{i=1}^n \rho_i = 1. \quad (2)$$

Таким образом, нахождение наилучшей альтернативы сводится к расчету по формуле (1) и выбору той из них, для которой результат расчета окажется максимальным.

При реализации векторной оптимизации формула (1) приобретает несколько иной вид. Вместо коэффициентов ρ_i вводятся коэффициенты двух уровней. Набор «векторного» уровня содержит коэффициенты важности векторных критериев Φ_1, Φ_2, Φ_3 , которые обозначим через w_1, w_2, w_3 соответственно. При этом для них выполняется соотношение вида (2)

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1.$$

Для каждого векторного критерия вводятся коэффициенты скалярного уровня, оценивающие относительные важности критериев, являющиеся их компонентами. Так, для компонентов векторного критерия Φ_1 получаем для критериев φ_{11} и φ_{12} их коэффициенты относительной важности w_{11} и w_{12} , причем для них снова выполняется соотношение вида (2)

$$w_{11} + w_{12} = 1.$$

Аналогично для критериев Φ_2, Φ_3 имеем соответственно

$$w_{21} + w_{22} + w_{23} = 1 \text{ и } w_{31} + w_{32} = 1.$$

Наличие этих коэффициентов позволяет ранжировать инверторы по каждому векторному критерию в отдельности. Например, для инвертора x получаем его оценку по качеству генерируемой им энергии, т. е. по векторному критерию Φ_1

$$\hat{\Phi}_1(x) = w_{11}\varphi_{11}(x) + w_{12}\varphi_{12}(x), \quad (3)$$

где $\hat{\Phi}_1(x)$ – численная оценка инвертора x .

Окончательная рандомизация представленных к выбору инверторов производится с помощью глобального критерия $\hat{\Phi}$, рассчитываемого по формуле

$$\hat{\Phi}(x) = w_1\hat{\Phi}_1(x) + w_2\hat{\Phi}_2(x) + w_3\hat{\Phi}_3(x), \quad (4)$$

т. е. с учетом оценок по всем векторным критериям и их ценностей.

Методика скаляризации Т. Саати

В задаче выбора инвертора в конечном итоге предполагается сравнение трех классов инверторов по семи критериям множества Ψ . Каждый из этих критериев может иметь числовое выражение. Например, критерий качества кривой выходного напряжения φ_{12} может характеризоваться коэффициентом искажения синусоидальности. Это значение, безусловно, необходимо обеспечить при исполь-

зовании выходного инвертора любого из рассматриваемых типов. Однако одно и то же требуемое значение этого коэффициента для разных инверторов достигается при различных тратах ресурсов (экономических, массогабаритных, энергетических и пр.). Следовательно, сравнение инверторов по этому критерию необходимо осуществлять по целому набору факторов. По этой причине соответствующий критерий целесообразно на начальном этапе выражать в порядковой шкале [9]. Это же касается и остальных шести критериев.

Оценку важности векторных критериев и их компонентов также естественно производить в порядковой шкале в соответствии с субъективными предпочтениями эксперта.

На заключительном этапе выбора осуществляется переход от порядковой шкалы оценки альтернатив к эквивалентной числовой оценке и последующей скаляризации.

Одним из наиболее широко применяемых методов скаляризации, использующих качественные оценки важности критериев и их значения на сравниваемых альтернативах, является метод анализа иерархий (МАИ), разработанный Т. Саати [10, 11]. Его преимущество состоит в том, что при переходе от качественной (нечисловой) оценки к числовой применима одна и та же процедура как при оценке ценностей критериев, так и при нормализации их значений для сравниваемых альтернатив.

Основой процедуры являются попарные сравнения оцениваемых объектов (критериев и их значений).

При попарных сравнениях используется шкала лингвистических выражений уровней важности (превосходства) критериев или их значений на конкретных альтернативах (табл. 1). Каждому такому качественному выражению в таблице приводится его числовой эквивалент, тем самым одновременно происходит оцифровка порядковой шкалы.

Таблица 1

Шкала превосходства

Лингвистическое выражение степени превосходства	Численный эквивалент
Отсутствие превосходства	1
Слабое превосходство	2
Заметное превосходство	3
Умеренное превосходство	4
Существенное превосходство	5
Сильное превосходство	6
Значительное превосходство	7
Большое превосходство	8
Подавляющее превосходство	9

Алгоритм попарного сравнения альтернатив x_i и y_j по некоторому критерию ϕ состоит в следующем.

1. Эксперт сравнивает альтернативы, и если с его точки зрения альтернатива x_i по критерию ϕ превосходит альтернативу y_j в степени, соответствующей числовому эквиваленту $r \geq 1$, то в матрицу попарного сравнения V в ячейку v_{ij} заносится число r , а в ячейку v_{ji} – число $1/r$. В соответствии с этим подходом на диагонали матрицы V будут размещены значения 1.

2. Матрица V является основанием для нахождения предварительных (ненормализованных) значений превосходства каждой альтернативы x_i над остальными альтернативами по критерию φ . Этот коэффициент рассчитывается по формуле

$$u_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m v_{ij}}.$$

Здесь m – число сравниваемых альтернатив.

3. Окончательное ранжирование альтернатив x_i ($i = \overline{1, m}$) относительно критерия φ производится по следующему набору нормализованных коэффициентов превосходства:

$$w_i = \frac{u_i}{w}, \quad i = \overline{1, m},$$

где $w = \sum_{i=1}^m u_i$.

Аналогичным образом производится процедура экспертного назначения нормализованных значений важности критериев. В этом случае попарное сравнение производится между каждой парой критериев φ_k и φ_s .

Иллюстрацию применения изложенной методики проведем на примере выбора выходного инвертора для двух наборов условий проектирования МГ. В первом случае предположим, что в данной местности отсутствуют уже действующие МГ и в ближайшей перспективе нет предпосылок к их созданию. Такую проектируемую МГ можно назвать изолированной. В этом случае снижается значимость критерия φ_{22} , оценивающего возможность интегрирования ее в систему местных генерирующих МГ.

Во втором случае предполагается либо существование в данной местности системы генерирующих МГ, либо планирование ее создания. Это делает возможной перспективу интегрирования проектируемой МГ в эту систему, что повышает ценность векторного критерия Φ_2 и его компоненты φ_{22} в особенности. Такую проектируемую МГ назовем интегрируемой.

Реализация рассматриваемой методики предполагает попарные сравнения векторных критериев и их компонент с целью определения значений их относительных ценностей для наилучшего выбора инвертора проектируемой МГ. При этом процесс и результаты этих сравнений должны учитывать условия проектирования. Это означает, что полученные значения ценностей критериев при проектировании изолированных и интегрируемых МГ должны быть различными.

В отличие от этого результаты попарных сравнений инверторов по каждому из семи критериев множества Ψ не зависят от условий проектирования, что следует из их определения. В связи с этим целесообразно первоначально провести именно эти сравнения, поскольку их результаты будут общими для изолированных и интегрируемых МГ.

Попарное сравнение инверторов по выделенным критериям

Применим методику Т. Саати для определения коэффициентов относительного превосходства инверторов по выделенным критериям отдельно по каждому критерию множества Ψ .

Проведем сравнение инверторов по критерию ϕ_{11} , т. е. по соответствию требованиям по обеспечению стабильности величины выходного напряжения.

Изменение выходного напряжения инвертора может возникнуть по двум причинам.

Во-первых, действующее значение выходного напряжения при других равных условиях прямо пропорционально величине постоянного напряжения питания инвертора и, следовательно, нестабильность этого напряжения приводит к соответствующему изменению выходного напряжения. Однако, ориентируясь на МГ с общей шиной постоянного тока [2], напряжение на которой жестко стабилизировано, можно исключить эту причину.

Во-вторых, изменение выходного напряжения может происходить из-за изменения величины и характера нагрузки. Зависимость выходного напряжения инвертора от величины тока нагрузки при постоянном напряжении на входе инвертора определяется его внешней характеристикой. Так, инверторы напряжения обладают жесткой внешней характеристикой, благодаря чему у этих преобразователей выходное напряжение практически не зависит от величины и характера нагрузки. Напротив, у инверторов тока внешняя характеристика мягкая, т. е. напряжение заметно зависит от нагрузки. Поэтому с целью компенсации изменения выходного напряжения в них применяют регулируемые компенсаторы реактивной мощности [12].

При сравнении инверторов I_1 и I_2 учтем, что в инверторе тока I_2 стабилизация напряжения, изменяющегося из-за изменения нагрузки, достигается регулированием компенсатора реактивной мощности. Это требует увеличения числа используемых тиристоров и установки комплекта индуктивностей, что ухудшает массогабаритные и стоимостные показатели.

Резюмируя вышесказанное, можно допустить, что с точки зрения критерия ϕ_{11} инвертор I_1 имеет в силу жесткости внешней характеристики подавляющее превосходство над инвертором I_2 , что согласно табл. 1 соответствует степени превосходства, равной 9.

Принцип действия универсального источника уровней инвертора I_3 позволяет получать величину выходного напряжения с требуемой точностью при неизменной для данного числа его уровней форме кривой. Кроме того, он позволяет стабилизировать выходное напряжение за время, равное одному такту кривой, т. е. длительности одного уровня. Например, для выходной частоты 50 Гц время компенсации для семиуровневого инвертора составит около 1,5 мс. Однако необходимо учитывать также сложность системы управления, которая у инвертора I_3 выше, чем у I_1 .

В результате можно допустить следующие качественные степени взаимного превосходства инверторов по данному критерию:

- I_1 существенно превосходит I_3 , т. е. в степени 5;
- I_3 умеренно превосходит I_2 , т. е. в степени 4.

Эти результаты отражены в табл. 2.

Таблица 2

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{11}

	I_1	I_2	I_3	$w_{11}(I_j)$
I_1	1	9	5	0,743
I_2	0,111	1	0,25	0,063
I_3	0,2	4	1	0,194

Подсчитаем относительные коэффициенты важности инверторов I_1 , I_2 и I_3 по критерию Φ_{11} .

Согласно методике, изложенной выше, находим компоненты вектора оценок

$$v_{11}(I_1) = \sqrt[3]{45} = 3,556; v_{11}(I_2) = \sqrt[3]{0,028} = 0,303; v_{11}(I_3) = \sqrt[3]{0,8} = 0,92.$$

Сумма компонентов вектора оценок, необходимая для нахождения относительных (нормированных) коэффициентов важности, равна

$$v_{11} = v_{11}(I_1) + v_{11}(I_2) + v_{11}(I_3) = 4,779.$$

Отсюда находим искомые относительные коэффициенты важности инверторов согласно критерию Φ_{11} :

$$w_{11}(I_1) = 0,743; w_{11}(I_2) = 0,063; w_{11}(I_3) = 0,194.$$

Эти значения указаны также в последнем столбце табл. 2.

Сравнение инверторов I_1 и I_2 по критерию Φ_{12} позволяет прийти к выводу, что в первом из них высокое качество кривой обеспечивается автоматически за счет ШИМ и, следовательно, не зависит от величины и характера нагрузки. В инверторе I_2 спектр кривой определяется естественной фильтрацией батареей конденсаторов (КБ) и нагрузкой. В результате этого форма кривой в I_2 изменяется при изменении нагрузки. Однако общий емкостной характер контура «КБ – нагрузка» обеспечивает достаточно высокое качество кривой, но не во всем диапазоне нагрузки. Таким образом, можно констатировать «существенное» превосходство инвертора I_1 над I_2 .

Сравнение инвертора I_1 с инвертором I_3 по критерию Φ_{12} показывает его «слабое» превосходство над инвертором I_3 , достигаемое за счет более простых силовой схемы и системы управления.

Превосходство I_3 над I_2 может быть выражено как «умеренное», поскольку форма кривой в инверторе I_3 , определяемая только количеством и величиной уровней, не зависит от нагрузки.

Эти результаты отражены в табл. 3. Соответствующие нормированные оценки значений критериев, полученные по описанной в п. 3 методике, приведены в последнем столбце данной таблицы.

Таблица 3

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{12}

	I_1	I_2	I_3	$w_{12}(I_j)$
I_1	1	5	2	0,570
I_2	1/5	1	1/4	0,097
I_3	1/2	4	1	0,333

Проведем сравнение инверторов I_1 , I_2 и I_3 по критериям второй группы φ_{21} , φ_{22} и φ_{23} .

Сравнивая указанные схемы по критерию структурной гибкости, позволяющей наращивать мощность МГ φ_{21} , следует утверждать, что инвертор I_2 «слабо» превосходит инвертор I_1 (числовой эквивалент 2). Подобный вывод обосновывается возможностью увеличивать мощность за счет параллельного подключения дополнительного инвертора или инверторов того же типа. Такое объединение неинерциальных (разрывных) выходных кривых инверторов напряжения невозможно без применения специальных фильтров.

Инверторы I_3 также допускают параллельное подключение, однако при этом необходимо увеличивать мощность выходного трансформатора. В связи с этим полагаем, что по критерию φ_{21} инвертор I_2 «заметно» превосходит инвертор I_3 (числовой эквивалент 3).

Результаты сравнения инверторов по критерию φ_{21} показаны в табл. 4. Нормированные оценки значений критериев, полученные по методике Т. Саати, приведены в последнем столбце данной таблицы.

Таблица 4

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию φ_{21}

	I_1	I_2	I_3	$w_{21}(I_j)$
I_1	1	1/2	2	0,297
I_2	2	1	3	0,540
I_3	1/2	1/3	1	0,163

Критерий φ_{22} оценивает инверторы по степени способности выходного инвертора МГ к интегрированию с инверторами других МГ того же типа. С этой точки зрения инверторы I_2 имеет преимущество перед остальными сравниваемыми преобразователями, поскольку их структура допускает параллельную работу инверторов нескольких МГ без применения фильтров.

В связи с этими свойствами инверторов целесообразно относительно критерия φ_{22} установить превосходство I_2 над I_1 и I_3 как «слабое» (числовой эквивалент 2). Превосходство I_1 над I_3 оценивается как «слабое» из-за необходимого наличия у последнего трансформатора.

В табл. 5 приведены результаты сравнения инверторов по критерию φ_{22} . В последнем ее столбце приведены соответствующие нормированные оценки значений критериев.

Таблица 5

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию φ_{22}

	I_1	I_2	I_3	$w_{22}(I_j)$
I_1	1	1/2	2	0,311
I_2	2	1	2	0,493
I_3	1/2	1/2	1	0,196

При сравнении инверторов по критерию надежности φ_{23} учитывалось, что применение ШИМ для генерации требуемой формы кривой связано с необходи-

мым применением мощных высокочастотных транзисторов, что в условиях форсированного импортозамещения отрицательно сказывается на надежности преобразователя. В то же время в инверторе I_2 применяются надежные низкочастотные тиристоры.

В инверторе I_3 не требуется применения высокочастотных транзисторов, однако их число значительно больше числа тиристоров в I_2 .

Указанные соображения отражены в табл. 6.

Таблица 6

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{23}

	I_1	I_2	I_3	$w_{23}(I_j)$
I_1	1	1/3	1/2	0,163
I_2	3	1	2	0,540
I_3	2	1/2	1	0,297

При сравнении инверторов по критериям третьей группы основаниями для качественной оценки служат число, вид и стоимость управляемых клапанов силовых схем.

Поскольку количество управляемых клапанов в инверторе I_3 значительно больше, чем в I_1 и I_2 , то числовые эквиваленты превосходства Φ_{31} по критерию этих инверторов над I_3 получают оценки, соответствующие 6 и 5 в табл. 7.

Таблица 7

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{31}

	I_1	I_2	I_3	$w_{31}(I_j)$
I_1	1	2	6	0,200
I_2	1/2	1	5	0,627
I_3	1/6	1/5	1	0,094

Превосходство инвертора I_1 над I_2 по данному критерию получает числовой эквивалент 2 из-за меньшего числа управляемых клапанов, однако при большей стоимости высокочастотных транзисторов инвертора напряжения по сравнению со стоимостью тиристоров инвертора тока.

Наконец, при сравнении инверторов по критерию Φ_{32} , соответствующему потерям энергии при коммутациях в клапанах, учитывались большие потери в высокочастотных транзисторах при реализации ШИМ в I_1 , а также большее превышение числа управляемых клапанов в инверторе I_3 по сравнению с I_2 .

Соответствующие результаты по критерию Φ_{32} отражены в табл. 8.

Таблица 8

Таблица попарных сравнений инверторов по критерию Φ_{32}

	I_1	I_2	I_3	$w_{32}(I_j)$
I_1	1	1/3	1/2	0,122
I_2	3	1	2	0,558
I_3	2	1/2	1	0,320

Выбор инвертора для изолированной МГ

Для выбора инвертора необходимо определить относительные значения ценностей трех введенных векторных критериев и их компонент, т. е. семи критериев, нормализованные значения которых найдены выше. Перейдем к определению этих величин для условий проектирования изолированных МГ.

При попарном сравнении векторных критериев Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 следует учесть, что выбранное разделение множества всех критериев на три подмножества подразумевалось при отсутствии специальных требований к функционированию МГ в данной местности и их относительные важности должны быть одинаковыми. Таким образом, для изолированной МГ назначаем равные нормализованные значения важности векторных критериев Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 :

$$w(\Phi_1) = 0,333; \quad w(\Phi_2) = 0,333; \quad w(\Phi_3) = 0,333.$$

Получим нормализованные значения важности критериев φ_{11} , φ_{12} подмножества Φ_1 .

Критерий φ_{11} , соответствующий обеспечению стабильности величины выходного напряжения МГ, примем «слабо» превосходящим по важности критерий φ_{12} , оценивающий качество кривой этого напряжения (табл. 9). Обоснованием этого суждения является тот факт, что даже кратковременное отклонение напряжения от номинального может привести к снижению производительности и качества продукции предприятия, получающего питание от МГ. Кратковременное отклонение формы кривой от синусоидальной приводит лишь к увеличению потерь энергии в некоторых видах нагрузок.

Таблица 9

Таблица сравнения важности критериев
 φ_{11} , φ_{12} подмножества Φ_1

	φ_{11}	φ_{12}
φ_{11}	1	2
φ_{12}	1/2	1

Расчеты, проведенные по данным табл. 9, приводят к следующим нормализованным значениям важности критериев φ_{11} , φ_{12} подмножества Φ_1 :

$$w(\varphi_{11}) = 0,667; \quad w(\varphi_{12}) = 0,333.$$

В нормализованных значениях важности критериев второй группы Φ_2 с учетом отсутствия требований интегрирования с другими МГ целесообразно снизить величину у критерия φ_{22} по сравнению с критериями φ_{21} и φ_{23} , что соответствует данным табл. 10.

Таблица 10

Таблица сравнения важности критериев
 φ_{21} , φ_{22} , φ_{23} подмножества Φ_2

	φ_{21}	φ_{22}	φ_{23}
φ_{21}	1	2	1/2
φ_{22}	1/2	1	1/3
φ_{23}	2	3	1

Этому соответствуют следующие значения важности критериев:

$$w(\varphi_{21}) = 0,297; w(\varphi_{22}) = 0,163; w(\varphi_{32}) = 0,540. \quad (5)$$

При сравнении критериев подмножества Φ_3 целесообразно учесть, что затраты на строительство МГ (критерий φ_{31}) имеют единовременный характер, тогда как потери энергии в оборудовании (критерий φ_{32}) приносят экономический ущерб в течение всего времени его эксплуатации. Поэтому примем «слабое» превосходство важности критерия φ_{32} над важностью критерия φ_{31} . Проведя расчеты, получим следующие нормализованные значения важности критериев φ_{31} , φ_{32} :

$$w(\varphi_{31}) = 0,333; w(\varphi_{32}) = 0,667.$$

Знание значений критериев φ_{11} , φ_{12} , φ_{21} , φ_{22} , φ_{23} , φ_{31} , φ_{32} для каждого из сравниваемых инверторов и значений их относительных нормализованных ценностей $w(\varphi_{11})$, $w(\varphi_{12})$, $w(\varphi_{21})$, $w(\varphi_{22})$, $w(\varphi_{23})$, $w(\varphi_{31})$, $w(\varphi_{32})$ позволяет определить для них значения векторных критериев по формулам вида (3).

По первому векторному критерию

$$\hat{\Phi}_1(I_1) = w(\varphi_{11}) \cdot \varphi_{11}(I_1) + w(\varphi_{12}) \cdot \varphi_{12}(I_1) = 0,685;$$

$$\hat{\Phi}_1(I_2) = w(\varphi_{11}) \cdot \varphi_{11}(I_2) + w(\varphi_{12}) \cdot \varphi_{12}(I_2) = 0,075;$$

$$\hat{\Phi}_1(I_3) = w(\varphi_{11}) \cdot \varphi_{11}(I_3) + w(\varphi_{12}) \cdot \varphi_{12}(I_3) = 0,240.$$

Таким образом, по первому векторному критерию (качество генерируемой электроэнергии) лучшим является инвертор I_1 , худшим – I_2 .

Проранжируем инверторы по второму векторному критерию

$$\hat{\Phi}_2(I_1) = w(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_1) + w(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_1) + w(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_1) = 0,227;$$

$$\hat{\Phi}_2(I_2) = w(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_2) + w(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_2) + w(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_2) = 0,532;$$

$$\hat{\Phi}_2(I_3) = w(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_3) + w(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_3) + w(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_3) = 0,241.$$

По второму векторному критерию (способность обеспечить надежное электроснабжение при существенных изменениях условий функционирования) лучшим является инвертор I_2 . Инверторы I_1 и I_3 по этому критерию почти равноценны.

По третьему векторному критерию получим следующий результат:

$$\hat{\Phi}_3(I_1) = w(\varphi_{31}) \cdot \varphi_{31}(I_1) + w(\varphi_{32}) \cdot \varphi_{32}(I_1) = 0,301;$$

$$\hat{\Phi}_3(I_2) = w(\varphi_{31}) \cdot \varphi_{31}(I_2) + w(\varphi_{32}) \cdot \varphi_{32}(I_2) = 0,474;$$

$$\hat{\Phi}_3(I_3) = w(\varphi_{31}) \cdot \varphi_{31}(I_3) + w(\varphi_{32}) \cdot \varphi_{32}(I_3) = 0,225.$$

По третьему векторному критерию (экономическая оценка) лучшим вновь оказывается инвертор I_2 , худшим – I_3 .

Окончательный выбор осуществляется по глобальному критерию (4):

$$\hat{\Phi}(I_1) = w_1 \cdot \hat{\Phi}_1(I_1) + w_2 \cdot \hat{\Phi}_2(I_1) + w_3 \cdot \hat{\Phi}_3(I_1) = 0,405;$$

$$\hat{\Phi}(I_2) = w_1 \cdot \hat{\Phi}_1(I_2) + w_2 \cdot \hat{\Phi}_2(I_2) + w_3 \cdot \hat{\Phi}_3(I_2) = 0,360;$$

$$\hat{\Phi}(I_3) = w_1 \cdot \hat{\Phi}_1(I_3) + w_2 \cdot \hat{\Phi}_2(I_3) + w_3 \cdot \hat{\Phi}_3(I_3) = 0,225.$$

Таким образом, для изолированной МГ следует выбирать автономный инвертор напряжения с формированием выходной кривой с помощью высокочастотной модуляции I_1 .

Выбор инвертора для интегрируемой МГ

При выборе инвертора для интегрируемой МГ следует скорректировать приведенные выше оценки векторного критерия Φ_2 и его компоненты φ_{22} , поскольку они непосредственно относятся к возможности интегрирования МГ. В силу необходимости нормализации это вызовет изменения ценностей векторных критериев Φ_1 и Φ_3 и двух других компонент критерия Φ_2 , т. е. критериев φ_{21} и φ_{23} . Обозначения всех измененных по сравнению с предыдущими формулами величин пометим звездочкой.

В силу сказанного целесообразно минимально повысить ценность векторного критерия Φ_2 , оставив Φ_1 и Φ_3 равными. Это соответствует принятию «слабого» превосходства важности Φ_2 относительно важностей Φ_1 и Φ_3 . Таким образом, новые значения коэффициентов важности векторных критериев в данном случае равны

$$w^*(\Phi_1) = 0,25; \quad w^*(\Phi_2) = 0,5; \quad w^*(\Phi_3) = 0,25.$$

При определении относительных ценностей компонент векторного критерия Φ_2 степень превосходства компонента φ_{22} была занижена по сравнению с φ_{21} и φ_{23} в соответствии с формулой (5), поскольку для изолированной МГ параллельная работа с другими станциями исключается. В рассматриваемом случае это не исключено, в связи с чем можно поднять ценность φ_{22} , приняв отсутствие превосходства между компонентами Φ_2 :

$$w^*(\varphi_{21}) = 0,333; \quad w^*(\varphi_{22}) = 0,333; \quad w^*(\varphi_{23}) = 0,333. \quad (6)$$

Изменения значений ценностей критериев в формуле (6) по сравнению с формулой (5) приводят к изменению рейтинговых значений инверторов относительно векторного критерия Φ_2 :

$$\hat{\Phi}_2^*(I_1) = w^*(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_1) + w^*(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_1) + w^*(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_1) = 0,257;$$

$$\hat{\Phi}_2^*(I_2) = w^*(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_2) + w^*(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_2) + w^*(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_2) = 0,524;$$

$$\hat{\Phi}_2^*(I_3) = w^*(\varphi_{21}) \cdot \varphi_{21}(I_3) + w^*(\varphi_{22}) \cdot \varphi_{22}(I_3) + w^*(\varphi_{23}) \cdot \varphi_{23}(I_3) = 0,241.$$

Несмотря на изменения рейтинговых значений по второму векторному критерию (способность обеспечить надежное электроснабжение при существенных изменениях условий функционирования) лучшим остается инвертор I_2 . Инверторы I_1 и I_3 по этому критерию вновь почти равноценны.

Для выбора инвертора для интегрируемой МГ рассчитываем значения глобального критерия по формуле (4):

$$\hat{\Phi}^*(I_1) = w_1^* \hat{\Phi}_1^*(I_1) + w_2^* \hat{\Phi}_2^*(I_1) + w_3^* \hat{\Phi}_3^*(I_1) = 0,375;$$

$$\hat{\Phi}^*(I_2) = w_1^* \hat{\Phi}_1^*(I_2) + w_2^* \hat{\Phi}_2^*(I_2) + w_3^* \hat{\Phi}_3^*(I_2) = 0,399;$$

$$\hat{\Phi}^*(I_3) = w_1^* \hat{\Phi}_1^*(I_3) + w_2^* \hat{\Phi}_2^*(I_3) + w_3^* \hat{\Phi}_3^*(I_3) = 0,225.$$

Таким образом, для интегрируемой МГ следует выбирать автономный инвертор тока на тиристорах с управляемой батареей коммутирующих конденсаторов и тиристорно-реакторным компенсатором I_2 .

Выводы

Предложенная методика многокритериального выбора выходного инвертора продемонстрирована для двух наборов условий проектирования МГ. В первом случае предполагается, что станция предназначена для местности, в которой ис-

ключается возможность ее интегрирования в систему с другими МГ. Здесь показано, что оптимальным выбором является применение автономного инвертора напряжения с формированием выходной кривой с помощью высокочастотной модуляции.

В случае, когда предполагается включение проектируемой станции в действующую систему объединенных по выходам МГ, предложенная методика рекомендует использование автономного инвертора тока с управляемой батареей коммутирующих конденсаторов и тиристорно-реакторным компенсатором.

Однако в силу незначительного отличия значений глобальных критериев для указанных инверторов во втором случае окончательный выбор целесообразно проводить по результатам дополнительных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кобец Б.Б., Волкова И.О.* Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
2. *Shuhui L., Proano J., Dong Z.* Microgrid power flow study in grid-connected and islanding modes under different converter control strategies // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2012. Pp. 1–8.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 10 с.
4. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники. Новосибирск: НГТУ, 2003. 664 с.
5. *Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Радионова М.В.* Нейронные сети в адаптивных преобразовательных комплексах // Анализ, синтез и управление в сложных системах: сб. науч. тр. Саратов, 2008. С. 19–28.
6. *Mirgorodskaya E.E., Kolchev V.A., Mityashin N.P., Tomashevskiy Y.B., Alkaravi R.D., Golembiovsky Y.M.* Selection of inverter modules for converters in autonomous power supply systems // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2020): Conference Proceeding, Saratov, September 24–25, 2020. Saratov, 2020. Pp. 237–243.
7. *Сафронов В.В.* Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования: монография. Саратов: Научная книга, 2009. 329 с.
8. *Миргородская Е.Е., Васильев Д.А., Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б.* Теория принятия решений в специальных организационно-технических системах: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2023. 130 с.
9. *Клигер С.Л., Косолапов М.С., Толстова Ю.Н.* Шкалирование при сборе и анализе социологической информации. М.: Наука, 1978. 107 с.
10. *Саати Т.Л.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
11. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
12. *Артюхов И.И., Митяшин Н.П., Серветник В.А.* Автономные инверторы тока в системах электропитания. Саратов: Сарат. политехн. ин-т, 1992. 152 с.

Статья поступила в редакцию 01 сентября 2023 г.

SELECTION OF OUTPUT INVERTER FOR MICROGRID

***E.E. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin, I.I. Artyukhov, M.E. Mamonychev,
P.A. Eryushev, R.V. Kozhanov****

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Polytechnicheskaya st., Saratov, 410054, Russian Federation

E-mail: mee85@inbox.ru, mityashinnp@mail.ru, ivart54@mail.ru, mamonychev@gmail.com,
eryushev.pavel@mail.ru, ljubimch@mail.ru

Abstract. *The paper considers the problem of a microgrid output inverter selecting, when information about operating conditions is uncertain. The following factors are considered as sources of uncertainty in information about operating conditions: the possibility of the load increasing in the area, for which the microgrid is being designed, the prospects for its integration into the local power supply system, based on the microgrid, operating in the given region, as well as possible changes in the element base due to import substitution. A system of criteria and a methodology for optimal selection have been developed, based on a combination of multi-vector optimization approaches and the hierarchy analysis method. The quality criterion of generated energy, the criterion of reliable operation in conditions of information uncertainty and the criterion of economic indicators were chosen as vector criteria. The total number of scalar criteria that are components of the specified vector criteria is seven. At the first stage of selection, an algorithm is used for expert assessment of the importance of vector criteria and their scalar components, as well as values of these criteria for compared alternatives, using of the hierarchy analysis method. At the second stage of selection, considered inverters are ranked according to a global criterion, calculated based on results of the first stage. The technique is demonstrated by choosing between three well-known schemes of autonomous inverters: a voltage inverter with PWM-shaping of the output curve, a current inverter with a variable structure and a group multilevel inverter based on a universal source of levels, when they are operating in autonomous or integrated into the system of other microgrid modes. The described selection technique can be used, when other microgrid conversion equipment devices are selecting.*

Keywords: *autonomous inverter, microgrid, criteria, multi-vector optimization, scalarization, hierarchy analysis method, power quality, equipment flexibility.*

REFERENCES

1. Kobets B.B., Volkova I.O. Innovatsionnoye razvitiye elektroenergetiki na baze kontseptsii SmartGrid [Innovative development of the electric power industry based on the SmartGrid concept]. M.: IATS Energiya, 2010. 208 p. (In Russian).
2. Shuhui L., Proano J., Dong Z. Microgrid power flow study in grid-connected and islanding modes under different converter control strategies // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2012. Pp. 1–8.
3. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektroobrazovaniya ob-

* Ekaterina E. Mirgorodskaya (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Nikita P. Mityashin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Ivan I. Artyukhov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Michael E. Mamonychev, Postgraduate Student.
Pavel A. Eryushev, Postgraduate Student.
Roman V. Kozhanov, Postgraduate Student.

- shchego naznacheniya [GOST 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standards for electric energy in general power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 10 p. (In Russian).
4. *Zinov'ev G.S.* Osnovy silovoy elektroniki [Power electronics fundamentals]. Novosibirsk: NGTU, 2003. 664 p. (In Russian).
 5. *Mirgorodskaya Ye.Ye., Mityashin N.P., Radionova M.V.* Neural networks in adaptive transformer complexes // Analiz, sintez i upravleniye v slozhnykh sistemakh: sb. nauch. tr. Saratov: 2008. Pp. 19–28 (In Russian).
 6. *Mirgorodskaya E.E., Kolchev V.A., Mityashin N.P., Tomashevskiy Y.B., Alkaravi R.D., Golembiovsky Y.M.* Selection of inverter modules for converters in autonomous power supply systems // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2020): Conference Proceeding, Saratov, September 24–25, 2020. Saratov, 2020. Pp. 237–243.
 7. *Safronov V.V.* Osnovy sistemnogo analiza: metody mnogovektornoy optimizatsii i mnogovektornogo ranzhirovaniya: monografiya [Fundamentals of system analysis: methods of multivector optimization and multivector ranking]. Saratov: Nauchnaya kniga, 2009. 329 p. (In Russian).
 8. *Mirgorodskaya Ye.Ye., Vasil'yev D.A., Mityashin N.P., Tomashevskiy Yu.B.* Teoriya prinyatiya resheniy v spetsial'nykh organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh: ucheb. posobiye [The theory of decision making in special organizational and technical systems]. Saratov: SGTU, 2023. 130 p. (In Russian).
 9. *Kliger S.L., Kosolapov M.S., Tolstova Yu.N.* Shkalirovaniye pri sbore i analize sotsiologicheskoy informatsii [Scaling when collecting and analyzing sociological information]. M.: Nauka, 1978. 107 p. (In Russian).
 10. *Saati T.L.* Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy [Making decisions. Hierarchy analysis method]. M.: Radio i svyaz', 1993. 278 p. (In Russian).
 11. *Saati T., Kerns K.* Analiticheskoye planirovaniye. Organizatsiya system [Analytical planning. The organization of systems]. M.: Radio i svyaz', 1991. 224 p. (In Russian).
 12. *Artyukhov I.I., Mityashin N.P., Servetnik V.A.* Avtonomnyye inventory toka v sistemakh elektropitaniya [Autonomous current inverters in power supply systems]. Saratov: Sarat. politekhn. in-t, 1992. 152 p. (In Russian).

УДК 621.3.078

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

А.В. Стариков, В.Д. Костюков *

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

E-mail: star58@mail.ru, kostyukovvlad@yandex.ru

Аннотация. Поставлена задача определения величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, при которой при равных токах в противоположных электромагнитах сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника, будет полностью скомпенсирована. Для достижения поставленной задачи рассмотрены уравнения движения ротора в поле электромагнитов. Показано, что необходимая величина смещения центра магнитной системы определяется из алгебраического уравнения четвертого порядка. Применено аналитическое решение Декарта – Эйлера этого уравнения. Найдены аналитические выражения, позволяющие определить рациональную величину смещения центра магнитной системы относительно оси вращения по известным параметрам электромагнитного подшипника. Проведено исследование устойчивости трехкантурной системы управления электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения. Доказано, что смещение центра магнитной системы на расчетную величину не влияет на устойчивость системы управления электромагнитным подшипником при настройках регуляторов, выбранных для центрального положения ротора.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, центр магнитной системы, система управления, устойчивость.

Введение

Электромагнитные подшипники предназначены для бесконтактного подвеса ротора в поле электромагнитов. При этом, как и любой подшипник, такой тип опор предназначен для поддержания ротора в заданном положении с требуемой жёсткостью. Как правило, для подвеса ротора необходимы два радиальных и один осевой электромагнитный подшипник. Эти подшипники воспринимают и передают нагрузку от подвижного узла на другие части конструкции, в том числе и силу тяжести ротора.

Уравнение движения ротора в поле электромагнитов каждого канала управления подшипника определяется дифференциальным уравнением [1]

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

Владислав Дмитриевич Костюков, аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = k_{эм2} \left[\frac{I_2^2}{(\delta - y)^2} - \frac{I_4^2}{(\delta + y)^2} \right] - G_y, \quad (1)$$

где y – перемещение ротора относительно центра магнитной системы по оси подшипника; $k_{эм2}$ – конструктивный коэффициент электромагнитного подшипника; I_2 и I_4 – токи в обмотках противоположных электромагнитов; δ – зазор между статором и ротором при расположении ротора в центре магнитной системы; G_y – сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника; t – время.

Уравнение (1) показывает, что величина силы, действующей на ротор, зависит как от соотношения токов в противоположных электромагнитах, так и от смещения ротора от центра магнитной системы каждой оси подшипника. Это позволяет предложить способ компенсации веса ротора за счет смещения центра магнитной системы относительно оси вращения [2, 3]. При этом актуальной задачей является определение рациональной величины смещения, при которой при равных токах в противоположных электромагнитах сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника, будет полностью скомпенсирована. Это позволит снизить токовую нагрузку на электромагнит, препятствующий действию силы веса, и расширить возможности управления в рамках ограничения токов.

Решение задачи

Уравнение (1) в статическом режиме при $\frac{d^2 y}{dt^2} = 0$ и равенстве токов в противоположных магнитах $I_2 = I_4 = \frac{U}{2R}$ запишется следующим образом:

$$k_{эм2} \left[\frac{U^2}{4R^2 (\delta - y)^2} - \frac{U^2}{4R^2 (\delta + y)^2} \right] - mg = 0, \quad (2)$$

где U – опорное напряжение питания электромагнитов; R – активное сопротивление каждой из обмоток; m – масса ротора, приходящаяся на одну ось; g – ускорение свободного падения.

Решение уравнения (2) позволит найти рациональную величину смещения центра магнитной системы, при которой сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника, будет полностью скомпенсирована. При этом будут наблюдаться равные токи в противоположных электромагнитах, управляемых по дифференциальному закону [4].

Уравнение (2) преобразуем к виду

$$\frac{k_{эм2} U^2}{4R^2 mg} \left[\frac{(\delta + y)^2 - (\delta - y)^2}{(\delta - y)^2 (\delta + y)^2} \right] = 1. \quad (3)$$

Произведя в (3) несложные алгебраические преобразования, в итоге получим уравнение, связывающее смещение y центра магнитной системы с параметрами электромагнитов и частью массы ротора, приходящейся на одну ось:

$$y^4 + d_1 y^2 + d_2 y + d_3 = 0, \quad (4)$$

где $d_1 = -2\delta^2$; $d_2 = -\frac{k_{эм2}U^2\delta}{R^2mg}$; $d_3 = \delta^4$.

Выражение (4) представляет собой неполное уравнение четвертого порядка, корни которого в соответствии с решением Декарта – Эйлера можно найти следующим образом [5]:

$$y_{1,2,3,4} = \pm\sqrt{v_1} \pm \sqrt{v_2} \pm \sqrt{v_3}. \quad (5)$$

Здесь v_1 , v_2 и v_3 – корни кубического уравнения

$$v^3 + av^2 + bv + c = 0, \quad (6)$$

где $a = \frac{d_1}{2}$; $b = \frac{d_1^2 - 4d_3}{16}$; $c = -\frac{d_2^2}{64}$.

Корни уравнения (6) можно найти с помощью решения Кардано [6]:

$$v_1 = A + B - \frac{a}{3}; \quad v_{2,3} = -\frac{A+B}{2} - \frac{a}{3} \pm j\frac{\sqrt{3}}{2}(A-B), \quad (7)$$

где

$$A = \sqrt[3]{-\frac{1}{2}\left(\frac{2a^3}{9} - \frac{ab}{3} + c\right) + \sqrt{Q}}; \quad B = \sqrt[3]{-\frac{1}{2}\left(\frac{2a^3}{9} - \frac{ab}{3} + c\right) - \sqrt{Q}};$$

$$Q = \frac{1}{27}\left(b - \frac{a^3}{3}\right)^3 + \frac{1}{4}\left(\frac{2a^3}{9} - \frac{ab}{3} + c\right)^2.$$

Подставив в A , B и Q значения a , b и c , выраженные через коэффициенты d_1 , d_2 и d_3 , получим:

$$A = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{эм2}^2 U^4 \delta^2}{128 R^4 m^2 g^2} + \sqrt{\frac{k_{эм2}^4 U^8 \delta^4}{16384 R^8 m^4 g^4} + \frac{k_{эм2}^2 U^4 \delta^8}{1728 R^4 m^2 g^2}}}; \quad (8)$$

$$B = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{эм2}^2 U^4 \delta^2}{128 R^4 m^2 g^2} - \sqrt{\frac{k_{эм2}^4 U^8 \delta^4}{16384 R^8 m^4 g^4} + \frac{k_{эм2}^2 U^4 \delta^8}{1728 R^4 m^2 g^2}}}. \quad (9)$$

С учетом того, что $a = -\delta^2$, формулы (5), (7) – (9) позволяют найти рациональную величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения:

$$y = \sqrt{v_1} - \sqrt{v_2} - \sqrt{v_3}. \quad (10)$$

Формула (10) получена из анализа корней (5) и физического смысла решаемой задачи.

Из (7) следует, что корни $v_{2,3}$ являются комплексно-сопряженными:

$$v_{2,3} = \alpha - \frac{a}{3} \pm j\beta,$$

где $\alpha = -\left(\frac{A+B}{2} + \frac{a}{3}\right)$; $\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}(A-B)$.

Для вычисления в (10) $\sqrt{v_2}$ и $\sqrt{v_3}$ без специализированного программного обеспечения можно воспользоваться формулами

$$\sqrt{v_2} = \alpha_1 + j\beta_1; \quad \sqrt{v_3} = \alpha_1 - j\beta_1,$$

где $\alpha_1 = \sqrt{\frac{\alpha}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^2 + \beta^2}{4}}}$; $\beta_1 = \frac{\beta}{2\alpha_1}$.

Более простой подход к определению рациональной величины смещения центра магнитной системы заключается в использовании другого математического описания процесса движения ротора в поле электромагнитов. При дифференциальном законе управления токами в противоположных электромагнитах справедливо следующее уравнение [4, 7–9]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = k_{эм} \left(\frac{I_2}{I_2 + I_4} - 0,5 \right) + k_F y - G_y, \quad (11)$$

где $k_{эм}$ – коэффициент, связывающий силу, действующую на ротор, с токами I_2 и I_4 ; k_F – коэффициент положительной обратной связи по перемещению.

В статике при $I_2 = I_4$ из (11) вытекает простая зависимость рациональной величины смещения центра магнитной системы от силы веса, приходящейся на одну ось электромагнитного подшипника:

$$y = \frac{G_y}{k_F} = \frac{mg}{k_F}. \quad (12)$$

Решение (12) является более простым, но оно не учитывает того факта, что величина k_F изменяет свою величину в зависимости от перемещения. Кроме того, следует учитывать, что точные значения коэффициентов $k_{эм}$ и k_F могут быть получены только методом моделирования магнитных полей электромагнитного подшипника в специализированных программах.

Пример расчета

Для примера рассчитаем рациональную величину смещения центра магнитной системы радиальных электромагнитных подшипников, разработанных для подвеса ротора опытного образца турбоагрегата 6ТК-Э дизеля локомотива [10]. В рассматриваемом агрегате масса ротора, приходящаяся на один электромагнитный подшипник, составляет $m = 18$ кг, а опорное напряжение широтно-импульсного преобразователя равно $U = 60$ В. При центральном положении ротора электромагниты характеризуются следующими параметрами: $R = R_2 = R_4 = 96,6$ Ом, $k_{эм} = 1272$ Н, $k_F = 1424000$ Н/м, зазор между статором и ротором $\delta = 0,5$ мм. Расчет по формуле (12) показывает, что рациональная величина смещения центра магнитной системы должна быть равна

$$y = \frac{18 \cdot 9,81}{1424000} = 124 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (13)$$

то есть 124 мкм.

Для расчета рациональной величины смещения по формулам (7) – (10) необходимо знать коэффициент $k_{эм2}$. Его можно определить из результатов моделирования электромагнитного подшипника при вариации соотношений токов в противоположных электромагнитах [10]:

$$k_{эм2} = \frac{F_{эм} \delta^2}{I_{20}^2 - I_{40}^2}, \quad (14)$$

где $F_{эм}$ – сила, действующая на ротор, находящийся в центре магнитной системы, при начальных значениях токов в противоположных обмотках I_{20} и I_{40} .

Величина $k_{эм2}$ может быть также определена из результатов натурных экспериментов на реальной действующей установке. Например, если известно, что при задании в рассматриваемом радиальном электромагнитном подшипнике токов $I_{20} = 0,373$ А, $I_{40} = 0,248$ А сила, действующая на ротор, равна $F_{эм} = 127,2$ Н [10], то коэффициент $k_{эм2}$ в соответствии с формулой (14) будет равен

$$k_{эм2} = \frac{127,2 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^2}{(0,373)^2 - (0,248)^2} = 4,121 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^2/\text{А}^2. \quad (15)$$

Используя значение $k_{эм2}$, полученное в (15), воспользуемся формулами (7) – (10) для расчета рациональной величины смещения центра магнитной системы рассматриваемого радиального электромагнитного подшипника. При этом получаются следующие значения величин, необходимых для определения рационального смещения: $Q = 4,3406 \cdot 10^{-42}$, $A = 1,6193 \cdot 10^{-7}$, $B = 4,2887 \cdot 10^{-8}$, $a = -2,5 \cdot 10^{-7}$. С учетом этого корни кубического уравнения (6) будут равны:

$$v_1 = 2,8815 \cdot 10^{-7}, \quad v_2 = -1,9073 \cdot 10^{-8} + j1,0309 \cdot 10^{-7},$$

$$v_2 = -1,9073 \cdot 10^{-8} - j1,0309 \cdot 10^{-7}.$$

Следовательно, рациональная величина центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника для турбоагнетателя 6ТК-Э в соответствии с формулой (10) составляет

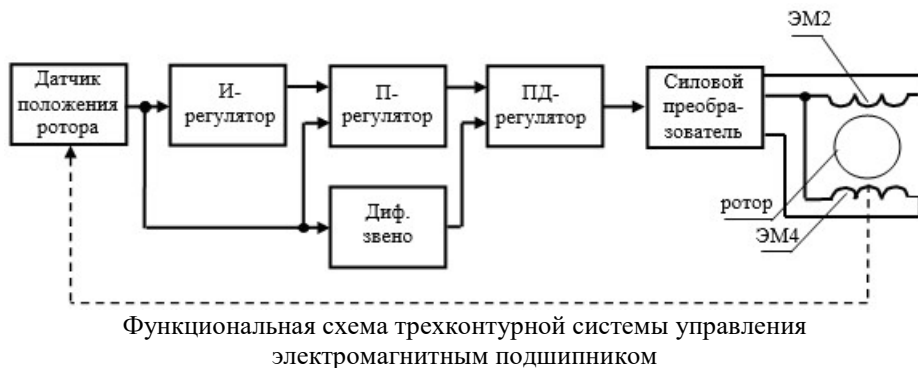
$$y = \sqrt{2,8815 \cdot 10^{-7}} - \sqrt{-1,9073 \cdot 10^{-8} + j1,0309 \cdot 10^{-7}} - \sqrt{-1,9073 \cdot 10^{-8} - j1,0309 \cdot 10^{-7}} = 122,6 \cdot 10^{-6}, \text{ м}. \quad (16)$$

Сравнение результатов (13) и (16) показывает, что они очень близки, поскольку расхождение не превышает 1,2 %. При этом следует отметить, что это полностью совпадает с электромагнитным расчетом радиальных подшипников турбоагнетателя 6ТК-Э [10].

Однако приведенный пример подразумевает, что ось y расположена вертикально. В то же время в радиальных электромагнитных подшипниках принято поворачивать систему координат на 45 угловых градусов для того, чтобы распределять силу веса на два электромагнита. Это приводит к снижению массы и, следовательно, силы веса, приходящейся на одну ось, в $\sqrt{2}$ раз. Тогда для рассматриваемого варианта электромагнитного подвеса ротора турбоагнетателя в расчетах необходимо принять $m = 12,728$ кг. С учетом этого рациональная величина смещения магнитной системы по оси y в соответствии с формулами (7) – (10) должна быть равна 92 мкм. Расчет по формуле (12) дает результат $y = 88$ мкм, то есть расхождение увеличилось до 4,3 %. Это связано, по мнению авторов, с пренебрежением нестационарностью коэффициента k_F , величина которого, в свою очередь, зависит от смещения ротора от центра магнитной системы.

Смещение центра магнитной системы относительно оси вращения ротора позволяет, как показано в [2], снизить величину опорного напряжения питания

обмоток электромагнитов. Это приводит к снижению потребления электрической энергии электромагнитными подшипниками и обеспечению более благоприятного теплового режима работы обмоток. В то же время смещение центра магнитной системы не влияет на устойчивость работы трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником (см. рисунок) [11].



Действительно, при выборе 12-разрядного широтно-импульсного модулятора с коэффициентом передачи $k_{ШИМ} = 0,0001221$ и датчика положения с $k_{\text{он}} = 10000000$ дискрет/м настройки регуляторов системы управления электромагнитным подшипником, определенные для центрального положения ротора, будут следующими: постоянная времени пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора $T_{\text{но}} = 0,079$ с, коэффициенты передачи пропорционального (П) и ПД регуляторов $k_{\text{но}} = k_n = 2$, постоянные времени дифференцирующего звена и интегрального (И) регулятора соответственно $k_{\text{осс}} = 0,0008$ с, $T_u = 0,008$ с [12, 13]. При смещении центра магнитной системы относительно оси вращения индуктивности обмоток электромагнитов принимают значения $L_2 = 2,92$ Гн, $L_4 = 2,25$ Гн, $L_{24} = L_{42} = 0,003$ Гн. При этом коэффициенты, характеризующие наводимые ЭДС в обмотках, равны $k_{E2} = 1623$ Вс/м, $k_{E4} = 1465$ Вс/м. В то же время коэффициенты, определяющие силу, действующую на ротор, имеют следующие значения: $k_{\text{эм}} = 1144$ Н, $k_F = 1407100$ Н/м. Передаточная функция замкнутой трехконтурной системы управления электромагнитного подшипника имеет вид [4]:

$$W_3(p) = \frac{b_{01}p^2 + b_{11}p + 1}{k_{\text{он}}(a_{01}p^5 + a_{11}p^4 + a_{21}p^3 + a_{31}p^2 + a_{41}p + 1)},$$

где $b_{01} = b_0 T_{\text{но}}$; $b_{11} = b_0 + T_{\text{но}}$; $a_{01} = \frac{a_0 T_u}{k_2}$; $a_{11} = \frac{(a_1 + k_1 b_0 T_{\text{но}}) T_u}{k_2}$;

$$a_{21} = \frac{[a_2 + k_1(b_0 + T_{\text{но}}) + k_2 b_0 T_{\text{но}}] T_u}{k_2}; \quad a_{31} = \frac{[a_3 + k_1 + k_2(b_0 + T_{\text{но}})] T_u}{k_2} + b_0 T_{\text{но}};$$

$$a_{41} = \frac{(k_2 - 1) T_u}{k_2} + b_0 + T_{\text{но}}; \quad k_{OY} = \frac{k_{\text{ШИМ}} k_{\text{эм}} U (I_{20} R_2 + I_{40} R_4)}{k_F R_2 R_4 (I_{20} + I_{40})^2};$$

$$b_0 = \frac{I_{20}(R_2 T_2 + L_{42}) + I_{40}(R_4 T_4 + L_{24})}{I_{20} R_2 + I_{40} R_4}; \quad a_0 = \frac{m}{k_F} \left(T_2 T_4 - \frac{L_{24} L_{42}}{R_2 R_4} \right); \quad a_1 = \frac{m(T_2 + T_4)}{k_F};$$

$$a_2 = \frac{m}{k_F} + \frac{k_{\Sigma M} \left[I_{20}(k_{E4} R_2 T_2 + k_{E2} L_{42}) + I_{40}(k_{E2} R_4 T_4 + k_{E4} L_{24}) \right]}{k_F R_2 R_4 (I_{20} + I_{40})^2} + \frac{L_{24} L_{42}}{R_2 R_4} - T_2 T_4;$$

$$a_3 = \frac{k_{\Sigma M} (I_{20} k_{E4} R_2 + I_{40} k_{E2} R_4)}{k_F R_2 R_4 (I_{20} + I_{40})^2} - (T_2 + T_4); \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2}; \quad T_4 = \frac{L_4}{R_4}; \quad k_1 = k_{no} k_{oy} k_{occ} k_{on};$$

$$k_2 = k_n k_{no} k_{oy} k_{on}.$$

Следовательно, устойчивость трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником определяется характеристическим уравнением

$$a_{01} p^5 + a_{11} p^4 + a_{21} p^3 + a_{31} p^2 + a_{41} p + 1 = 0. \quad (17)$$

При $I_{20} = I_{40} = 0,311$ А уравнение (17) имеет следующие значения коэффициентов:

$$a_{01} = 1,2849 \cdot 10^{-11} \text{ с}^5, \quad a_{11} = 7,7495 \cdot 10^{-9} \text{ с}^4,$$

$$a_{21} = 1,841 \cdot 10^{-5} \text{ с}^3, \quad a_{31} = 2,9002 \cdot 10^{-3} \text{ с}^2,$$

$$a_{41} = 0,1118 \text{ с}.$$

Решение (17) показывает, что корни характеристического уравнения равны

$$p_{1,2} = -219,279 \pm j1142,872, \quad p_3 = -111,908,$$

$$p_4 = -39,713, \quad p_5 = -12,931.$$

Поскольку все корни имеют отрицательные вещественные части, трехконтурная система управления электромагнитным подшипником остается устойчивой при выбранных параметрах регуляторов и смещении центра магнитной системы относительно оси вращения на рациональную величину [14, 15].

Выводы

1. Найденные аналитические выражения позволяют определить рациональную величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, при которой происходит компенсация силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.

2. Смещение центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора на расчетную величину не влияет на устойчивость системы управления при настройках регуляторов, выбранных для центрального положения ротора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавлёв Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчёт, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
2. Стариков А.В., Костюков В.Д. Анализ работы электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31, № 1. С. 103–123.
3. Стариков А.В., Рокало Д.Ю., Костюков В.Д. Анализ устойчивости системы управления электромагнитным подшипником с учетом вариации его параметров // Вопросы электротехнологии. 2023. № 2 (39). С. 66–73.
4. Стариков А.В. Методология синтеза многосвязной системы электромагнитных подшипников с повышенными жесткостными характеристиками энергетических объектов: дис. ... докт. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2013. 354 с.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 835 с.
6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1965. 608 с.
7. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Стариков С.А. Математическая модель радиального электромагнитного подшипника как объекта управления // Электротехнические системы и комплексы. Межвузовский сборник науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 1998.
8. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Стариков С.А. Математическая модель электромагнитного подшипника как объекта управления с учетом непостоянства его параметров // Известия высших учебных заведений «Электромеханика». 2012. № 4. С. 31–34.
9. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Беляева И.С. Математическая модель осевого электромагнитного подшипника с учетом вихревых токов // Известия высших учебных заведений «Электромеханика». 2014. № 5. С. 52–56.
10. Макаричев Ю.А. Методы анализа и синтеза активных электромагнитных подшипников: дис. ... докт. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2013. 350 с.
11. Патент России № 2395150. Система управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, С.А. Стариков (Россия) // Оpubл. 20.07.2010, Бюл. № 20.
12. Стариков А.В., Стариков С.А. Параметрический синтез регуляторов многоконтурной системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 1 (29). С. 192–200.
13. Стариков А.В., Лисин С.Л. Структурно-параметрический синтез систем управления неустойчивыми объектами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 4 (40). С. 53–58.
14. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
15. Воронов А.А., Воронова А.А., Бабаков Н.А. и др. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления. М.: Высш. шк., 1986. 367 с.

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2023 г.

DETERMINATION OF THE RATIONAL SHIFT VALUE THE CENTER OF THE MAGNETIC SYSTEM ELECTROMAGNETIC BEARING

*A.V. Starikov, V.D. Kostukov**

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

E-mail: star58@mail.ru, kostyukovvlad@yandex.ru

Abstract. *The article sets the task of determining the rational value of the displacement of the center of the magnetic system of an electromagnetic bearing relative to the axis of rotation, at which, with equal currents in opposite electromagnets, the weight force falling on one axis of the bearing will be completely compensated. To achieve the set, the equations of motion of the rotor in the field of electromagnets are considered. It is shown that the rational value of the displacement of the center of the magnetic system is determined from a fourth-order algebraic equation. The analytical solution of Descartes-Euler of this equation is applied. Analytical expressions are found that allow to determine the rational value of the displacement of the center of the magnetic system relative to the axis of rotation according to the known parameters of the electromagnetic bearing. A study was made of the stability of a three-circuit control system of an electromagnetic bearing when the center of the magnetic system is shifted by a rational value relative to the axis of rotation. It is proved that the displacement of the center of the magnetic system by the calculated value does not affect the stability of the control system of the electromagnetic bearing with the settings of the regulators selected for the central position of the rotor.*

Keywords: *electromagnetic bearing, magnetic system center, control system, stability.*

REFERENCES

1. Zhuravlev Yu.N. Aktivnye magnitnye podshipniki: teoriya, raschyot, primeneniye [Active magnetic bearings: theory, calculation, application]. St. Petersburg: Politekhnik, 2003. 206 p. (In Russian).
2. Starikov A.V., Kostyukov V.D. Analiz raboty elektromagnitnykh podshipnikov pri smeshchenii centra magnitnoy sistemy otnositel'no osi vrashcheniya i variacii napryazheniya pitaniya [Analysis of the operation of electromagnetic bearings when the center of the magnetic system is displaced relative to the axis of rotation and variations in supply voltage] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2023. Vol. 31, No. 1. Pp. 103–123. (In Russian).
3. Starikov A.V., Rokalo D.Yu., Kostyukov V.D. Analiz ustojchivosti sistemy upravleniya elektromagnitnym podshipnikom s uchyotom variacii ego parametrov [Analysis of the stability of the control system of an electromagnetic bearing, taking into account the variation of its parameters] // Questions of Electrotechnology. 2023. No. 2 (39). Pp. 66–73. (In Russian).
4. Starikov A.V. Metodologiya sinteza mnogosvyaznoj sistemy elektromagnitnykh podshipnikov s povyshennymi zhestkostnymi harakteristikami energeticheskikh ob'ektov [Methodology for the synthesis of a multiply connected system of electromagnetic bearings with increased rigidity characteristics of power facilities]: dis. ... doc. tech. Sciences. Samara: SamGTU, 2013. 354 p. (In Russian).
5. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Handbook of mathematics for scientists and engineers]. M.: Nauka, 1984. 835 p. (In Russian).

* *Alexander V Starikov (Dr. (Techn.)), Professor.
Vladislav D. Kostukov, Postgraduate Student.*

6. *Bronstein I.N., Semendyaev K.A.* Spravochnik po matematike [Handbook of mathematics]. M.: Nauka, 1965. 608 p. (In Russian).
7. *Makarichev Yu.A., Starikov A.V., Starikov S.A.* Matematicheskaya model' radial'nogo elektromagnitnogo podshipnika kak ob'ekta upravleniya [Mathematical model of a radial electromagnetic bearing as a control object] // Electrotechnical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific. works. Magnitogorsk: MSTU, 1998. (In Russian).
8. *Makarichev Yu.A., Starikov A.V., Starikov S.A.* Matematicheskaya model' elektromagnitnogo podshipnika kak ob'ekta upravleniya s uchetom nepostoyanstva ego parametrov [Mathematical model of an electromagnetic bearing as a control object, taking into account the variability of its parameters] // Izvestia of higher educational institutions "Electromechanics". 2012. No. 4. Pp. 31–34. (In Russian).
9. *Makarichev Yu.A., Starikov A.V., Belyaeva I.S.* Matematicheskaya model' oseвого elektromagnitnogo podshipnika s uchetom vihrevykh tokov [Mathematical model of an axial electromagnetic bearing taking into account eddy currents] // Izvestiya of higher educational institutions "Electromechanics". 2014. No. 5. Pp. 52–56. (In Russian).
10. *Makarichev Yu.A.* Matematicheskaya model' oseвого elektromagnitnogo podshipnika s uchetom vihrevykh tokov [Methods of analysis and synthesis of active electromagnetic bearings]: dis. ... doc. tech. Sciences. Samara: SamGTU, 2013. 350 p. (In Russian).
11. Russian patent No. 2395150. Sistema upravleniya elektromagnitnym podvesom rotora [Control system for the electromagnetic suspension of the rotor] / *A.V. Starikov, S.A. Starikov* (Russia) // Publ. 20.07.2010, Bull. No. 20. (In Russian).
12. *Starikov A.V., Starikov S.A.* Parametricheskij sintez regulyatorov mnogokonturnoj sistemy upravleniya elektromagnitnym podvesom rotora [Parametric synthesis of regulators of a multi-circuit control system for the electromagnetic suspension of the rotor] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2011. No. 1 (29). Pp. 192–200. (In Russian).
13. *Starikov A.V., Lisin S.L.* Strukturno-parametricheskij sintez sistem upravleniya neustojchivymi ob'ektami [Structural-parametric synthesis of control systems for unstable objects] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2013. No. 4 (40). Pp. 53–58. (In Russian).
14. *Besekersky V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems]. M.: Nauka, 1975. 768 p. (In Russian).
15. *Voronov A.A., Voronova A.A., Babakov N.A. etc.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Ucheb. dlya vuzov po spec. «Avtomatika i telemekhanika» [Theory of automatic control: Proc. for universities on special "Automation and telemechanics"]. Part 1. Theory of linear systems of automatic control. M.: Higher. Shk., 1986. 367 p. (In Russian).