
НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 3 (76)

2019

УДК 681.51(06)
Н 76

Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор

Лемешко Борис Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Алексеев Сергей Владимирович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Шокин Юрий Иванович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

Воевода Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Члены редколлегии

Алаин Бриллиард, д-р, проф., Университет Мюлуза, Франция

Алиферов Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Виролайнен Вели Матти, проф., Технологический университет Лаппеэнранта, Финляндия

Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск

Воропай Николай Иванович, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск

Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог

Гозбенко Валерий Ерофеевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск

Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург

Зиновьев Геннадий Степанович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск

Лути Серджио, д-р, проф., Падуанский университет, Италия

Лисицина Лилия Ивановна, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Мухомад Юрий Федорович, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск

Наумова Елена Николаевна, д-р техн. наук, проф., Университет Тафтса, США

Неизвестный Игорь Георгиевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск

Нейман Владимир Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Носек Ярослав, д-р техн. наук, проф., Технический университет Либерец, Чехия

Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, проф., СПИИРАН, г. Санкт-Петербург

Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск

Рылов Анатолий Игоревич, д-р физ.-мат. наук, Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Степанов Олег Андреевич, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

Уранчимэг Тудедагва, д-р техн. наук, проф., Хемницкий технический университет, Германия

Фомин Василий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск

Хабаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Ханова Анна Алексеевна, д-р техн. наук, проф., АГТУ, г. Астрахань

Хи Жаохуи, Харбинский университет науки и технологии, Китай

Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Чичиндаев Александр Васильевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Шандаров Станислав Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Адрес редакции, издателя: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ

Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98

E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru

Web Site: <http://journals.nstu.ru/vestnik/>

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ»)

УДК 681.51(06)

© Коллектив авторов, 2019

© Новосибирский государственный
технический университет, 2019

**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 1814-1196

№ 3 (76)

2019

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Афанасьева А.А., Назаренко Д.И., Швецова-Шиловская Т.Н., Казарезова Е.В. Математическое моделирование миграции и многостадийных превращений химических веществ в подземных водах.....	7
Гаврилов М.Н., Кононов Ю.М., Броник С.С. Автоматизация обработки индикаторных режимов работы нефтяных скважин в базе данных непрерывных записей поднасосных телеметрических систем на основе структурированных sql-запросов	21
Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Аналитический синтез исполнительных систем микроботов в условиях неопределенности	33
Клер А.М., Алексеюк В.Э. Повышение точности идентификации параметров математических моделей существующего теплоэнергетического оборудования.....	57
Лошаков К.П., Мамонова Т.Е. Алгоритм отслеживания и выделения движущихся объектов в видеопотоке.....	77
Перов А.А. Применение статистических тестов NIST для анализа выходных последовательностей блочных шифров	87

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Генне Д.В., Барсуков Р.В., Нестеров В.А. Исследование влияния толщины слоя жидкости на частотные характеристики колебательной системы.....	97
--	----

ЭНЕРГЕТИКА

Манусов В.З., Матренин П.В., Хасанзода Н. Применение алгоритмов роевого интеллекта в управлении генерирующим потребителем с возобновляемыми источниками энергии.....	115
Нейман В.Ю. Энергопреобразование ненасыщенного электромагнитного двигателя при отрыве якоря внешними силами.....	135

Хомутов С.О., Серебряков Н.А. Повышение качества краткосрочного прогнозирования электропотребления группы точек поставки электроэнергии сельхозпроизводителей с помощью инструментов машинного обучения	149
Правила для авторов	169

Корректор *Л.Н. Кинит*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № 77–1599 от 10 февраля 2000 г.
Периодичность издания – 4 номера в год.
Журнал реферирован в ВИНТИ (<http://www.2.viniti.ru>)
Лицензия ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 18.09.2019. Выход в свет 20.09.2019.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 15,05. Печатных листов 10,75. Издательский № 197. Заказ № 1423.
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

SCIENCE BULLETIN OF THE NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISSN 1814-1196

№ 3 (76)

2019

УДК 681.51(06)
H 76

Journal was established by
Novosibirsk State Technical University

Editorial board

Chief editor

Lemeshko B. Yu., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Alekseenko S. V., D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Thermophysics, Novosibirsk, RF

Vostretsov A. G., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Shokin Yu. I., D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A. A., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Brillard A., D. Sc. (Eng.), Universite de Haute Alsace, Mulhouse, France

Aliferov A. I., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Virolainen V. M., professor, Lappeenranta Teknillinen Yliopisto, Finland

Voronin V. V., D. Sc. (Eng.), Pacific National University, Khabarovsk, RF

Voropay N. I., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Eng.), Melentiev Energy Systems Institute,

Irkutsk, RF

Voskoboinikov Yu. E., D. Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,

Novosibirsk, RF

Gaiduk A. R., D. Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF

Gozbenko V. E., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF

Grigor'ev Yu. D., D. Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF

Zinoviev G. S., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Kryukov A. V., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF

Lupi Sergio, D. Sc. (Eng.), Università degli Studi di Padova, Padua, Italy

Lisitsina L. I., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Mukhopad Yu. F., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF

Naumova E.N., PhD. (Math.), Tufts University, USA

Neizvestnyi I. G., D. Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Neiman V. Yu., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Nosek J., D. Sc. (Eng.), Technical University of Liberec, Czech Republic

Ronzhin A. L., D. Sc. (Eng.), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of sciences,

Saint-Petersburg, RF

Ruban A. I., D. Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF

Rylov A. I., D. Sc. (Phys. & Math.), Sobolev Institute of Mathematics, Novosibirsk, RF

Stepanov O. A., D. Sc. (Eng.), ITMO University, Saint-Petersburg, RF

Uranchimeg T., D.Sc. (Eng.), Technische Universität Chemnitz, Germany

Fomin V. M., D. Sc. (Phys. & Math.), Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics SB RAS, Novosibirsk, RF

Khabarov V. I., D. Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF

Khanova A. A., D. Sc. (Eng.), Astrakhan State Technical University, Astrakhan, RF

Xi Zhaohui, Harbin University of Science and Technology, China

Khlebnikov M. V., D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF

Chichindaev A. V., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Shandarov S. M., D. Sc. (Phys. & Math.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Editorial Address: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Tel. (383) 346-56-88, Fax (383) 344-49-98

E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru

Web Site: <http://journals.nstu.ru/vestnik/>

УДК 681.51(06)

© Authors, 2019

© Novosibirsk State Technical University, 2019

**SCIENCE BULLETIN
OF THE NOVOSIBIRSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY**

ISSN 1814-1196

№ 3 (76)

2019

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Afanasyeva A.A., Nazarenko D.I., Shvetsova-Shilovskaya T.N., Kazarezova E.V. Mathematical modeling of migration and multi-stage transformations of chemicals in groundwater	7
Gavrilov M.N., Kononov Yu.M., Bronik S.S. Automation of processing of indicator modes of oil wells in the database of continuous records of sub-pump telemetry systems based on structured sql-queries	21
Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. Analytical design of micro-robot executive systems under uncertainty.....	33
Kler A.M., Alekseyuk V.E. Improving the accuracy of identifying mathematical model parameters of the existing thermal power equipment	57
Loshakov K.P., Mamonova T.E. An algorithm of tracking and detection of moving objects in a video stream	77
Perov A.A. Using NIST statistical tests for the analysis of the output sequences of block ciphers.....	87

*INSTRUMENTATION, METROLOGY AND INFORMATION
AND MEASURING DEVICES AND SYSTEMS*

Khmelev V.N., Shalunov A.V., Genne D.B., Barsukov R.V., Nesterov V.A. Investigation of the thickness effect of a sprayed liquid layer on the frequency characteristics of an oscillatory system.....	97
---	----

POWER ENGINEERING

Manusov V.Z., Matrenin P.V., Khasanzoda N. Application of swarm intelligence algorithms to energy management by a generating consumer with renewable energy sources.....	115
Neyman V.Yu. Energy conversion in a non-saturated electromagnetic motor with the armature detached by external forces.....	135

Khomutov S.O., Serebryakov N.A. Increasing the quality of short-term load forecasting of the delivery point cluster of agricultural producers with a learning machine	149
Rules for authors	169

Editor *L.N. Kinsht*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

The journal is registered by Russian Federation Committee on the press.
The certificate on registration of mass media of PI No. 77-1599 of February 10, 2000.
Publication frequency – 4 numbers a year.
Journal referenced in VINITI (<http://www.viniti.ru>)
License ID 04303 from 20.03.2001. Signed in print September 18, 2019.
Date of publication September 20, 2019. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 15,05. Printed pages 10,75.
Publishing number 197. Order number 1423.

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 502.55

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-7-20

Математическое моделирование миграции и многостадийных превращений химических веществ в подземных водах*

**А.А. АФАНАСЬЕВА, Д.И. НАЗАРЕНКО, Т.Н. ШВЕЦОВА-ШИЛОВСКАЯ,
Е.В. КАЗАРЕЗОВА**

111024, Россия, г. Москва, шоссе Энтузиастов, 23, Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии. E-mail: dir@gosniokht.ru

Загрязнение подземных вод химическими веществами и продуктами деградации является одной из важных экологических проблем. Для оценки масштабов загрязнения подземных вод широко используются методы математического моделирования. Математическая модель, описывающая распространение химического вещества и неограниченного числа продуктов его деградации в подземных водах, представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных.

В настоящее время широко известны численные методы решения таких систем. Методов, позволяющих получить аналитическое решение таких систем, существует гораздо меньше, и, кроме того, они ограниченно применимы. В статье представлен общий метод построения аналитического решения системы дифференциальных уравнений, описывающих миграцию и многостадийные превращения химических веществ в подземных водах по последовательным реакциям первого порядка. Для описания кинетики многостадийных превращений химических веществ использована теория матриц.

На основе разработанного метода проведено моделирование распространения пестицидов и продуктов их деградации в подземных водах. Источником токсичных веществ является полигон захоронения пестицидов «Большие Избищи», расположенный в Липецкой области. На полигоне захоронено примерно 1400 т ядохимикатов и существует потенциальная опасность загрязнения токсичными веществами подземных вод. Под полигоном на глубине около 63 м находится водоносный горизонт, являющийся основным источником водоснабжения населения. Выполнена оценка возможности загрязнения пестицидами и продуктами их деградации водоносного горизонта. Значения прогнозируемых концентраций пестицидов и продуктов их деградации находятся в пределах $10^{-9} \dots 10^{-14}$ мг/л.

Корректность предлагаемого метода подтверждена путем сравнения расчетных значений концентраций с данными натурных наблюдений.

Ключевые слова: подземные воды, математическое моделирование, токсичные вещества, продукты деградации, пестициды, гербициды, последовательные реакции первого порядка, уравнение турбулентной диффузии, аналитический метод

* Статья получена 12 февраля 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогнозирования уровня загрязнения подземных вод становится всё более актуальной в связи с возрастающим воздействием на гидросферу [1]. Для оценки масштабов загрязнения подземных вод и разработки специальных защитных мероприятий необходимы гидрогеологические прогнозы миграции загрязнителей в подземных водах, под которыми понимается научное предвидение пространственно-временных закономерностей изменения показателей качества воды [2–6].

Гидрогеологические прогнозы миграции загрязнителей в подземных водах должны опираться на достаточно строгие математические модели, описывающие сложные физико-химические процессы, происходящие в системе. Необходимо также учитывать, что вещества, попавшие в подземные воды, способны распадаться и образовывать «дочерние» продукты, иногда более токсичные, чем исходное вещество.

Для оценки распространения химических веществ (ХВ) в подземных водах существует большое количество математических моделей, основанных на решении уравнения турбулентной диффузии [1–16].

Математические модели распространения загрязнителей в подземных водах, основанные на численном решении уравнения турбулентной диффузии (далее – численные модели), широко представлены в литературе [7–16]. Данные модели позволяют учесть большинство факторов, сопровождающих процесс распространения загрязнителя, а также сложную конфигурацию водоносного пласта, пространственную неоднородность его свойств и т. д. Вместе с тем применение численных моделей в ряде случаев оказывается недостаточно эффективным из-за значительной неопределенности исходных данных, больших затрат времени на подготовку к решению задачи; отмечаются также затруднения в связи с проблемой сходимости и устойчивости решений, зависящих от техники дискретизации. Обычно исходных сведений о параметрах водоносной системы и миграции загрязнителя недостаточно. В этих условиях использование моделей, основанных на аналитических решениях уравнения турбулентной диффузии (далее – аналитические модели), является наиболее целесообразным [17].

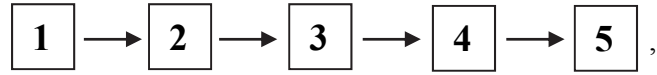
Среди численных моделей, способных оценить распространение загрязнителя и продуктов его деградации в подземных водах, можно выделить модели RT3D, BIOPLUME III, BIOF&T 2-D/3-D, PRZM3 [7–17]. Наиболее известной аналитической моделью для решения подобной задачи является скрининговая модель BIOCHLOR [18]. Однако данная модель обладает следующими недостатками:

- позволяет моделировать распространение только перхлорэтилена и трех продуктов его деградации в подземных водах;
- не позволяет учесть распространение загрязнителя за счет вертикальной фильтрации.

Таким образом, актуальной задачей является разработка общего метода, основанного на аналитических решениях уравнения турбулентной диффузии, предназначенного для оценки распространения различных ХВ и продуктов их деградации в подземных водах.

1. МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Распространение химического вещества и продуктов его разложения, образующихся по цепочке (схеме) последовательных химических реакций первого порядка



описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных [9]:

$$R \frac{\partial c_i}{\partial t} - D'_X \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} - D'_Y \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} - D'_Z \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} + v' \frac{\partial c_i}{\partial x} = k'_{i-1} c_{i-1} - k'_i c_i, \quad (1)$$

$$i = \overline{1, n}, \quad n = 5,$$

при начальных и граничных условиях вида

$$c_1(x, y, z, 0) = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad 0 < y < \infty, \quad 0 < z < \infty$$

$$c_2(x, y, z, 0) = c_3(x, y, z, 0) = c_4(x, y, z, 0) = c_5(x, y, z, 0) = 0,$$

$$c_1(0, y, z, t) = c_1^0, \quad -\frac{Z}{2} < z < \frac{Z}{2}, \quad -\frac{Y}{2} < y < \frac{Y}{2}, \quad t > 0, \quad (2)$$

$$c_2(0, y, z, t) = c_3(0, y, z, t) = c_4(0, y, z, t) = c_5(0, y, z, t) = 0,$$

где R – фактор ретардации, безразмерный; c_i – концентрация i -го вещества, моль/м³; D'_X , D'_Y , D'_Z – коэффициенты дисперсии в направлениях координатных осей x , y и z , соответственно, м²/с; k'_i – константа скорости i -й химической реакции, 1/с; v' – скорость движения воды в порах почвы в направлении оси x , м/с; t – время, с; n – общее число продуктов в системе реакций; Y , Z – размеры источника по осям y , z соответственно, м.

Введем линейный дифференциальный оператор $L(c_i)$:

$$L(c_i) = \frac{\partial c_i}{\partial t} - D'_X \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} - D'_Y \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} - D'_Z \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} + v' \frac{\partial c_i}{\partial x}, \quad L(c_i) = k'_{i-1} c_{i-1} - k'_i c_i, \quad (3)$$

где $D_X = D'_X/R$; $D_Y = D'_Y/R$; $D_Z = D'_Z/R$; $v = v'/R$; $k_i = k'_i/R$.

Система уравнений, описывающая динамику изменения концентраций исходного вещества и продуктов его разложения в слое подземных вод, в соответствии с приведенной выше схемой имеет вид [19]

$$\begin{cases} L(c_1) = -k_1 c_1, \\ L(c_2) = k_1 c_1 - k_2 c_2, \\ L(c_3) = k_2 c_2 - k_3 c_3, \\ L(c_4) = k_4 c_4 - k_5 c_5. \end{cases} \quad (4)$$

Систему уравнений (3) можно представить в матричном виде с использованием квадратной кинетической матрицы \underline{K} , $\dim(5 \times 5)$ [20]:

$$\underline{L}(c) = \underline{K} \cdot c, \quad \underline{K} = \begin{pmatrix} -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 & -k_5 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Система уравнений (5) представляет собой однородную систему линейных уравнений с постоянными коэффициентами. Такая система может быть решена методом диагонализации [20]. Вектор концентраций имеет вид

$$c = \underline{Z} \cdot \underline{\beta}, \quad c(0) = c^0, \quad (6)$$

где \underline{Z} – квадратная невырожденная матрица, $\dim(5 \times 5)$, образованная из собственных векторов кинетической матрицы \underline{K} ; $\underline{\beta}$ – вектор, составляющими которого являются линейные комбинации концентраций $c_1 \dots c_5$.

С помощью матрицы \underline{Z}^{-1} вектор c можно преобразовать в вектор $\underline{\beta}$:

$$\underline{\beta} = \underline{Z}^{-1} \cdot c, \quad \underline{\beta}(0) = \underline{\beta}^0 = \underline{Z}^{-1} \cdot c^0 \quad (7)$$

Например, для системы из четырех последовательных реакций матрица \underline{Z} имеет вид

$$\underline{Z} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{k_1 - k_2} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1 k_2}{(k_1 - k_2)(k_1 - k_3)} & -\frac{k_2}{k_2 - k_3} & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1 k_2 k_3}{(k_1 - k_2)(k_1 - k_3)(k_1 - k_4)} & \frac{k_2 k_3}{(k_2 - k_3)(k_2 - k_4)} & -\frac{k_3}{k_3 - k_4} & 1 & 0 \\ \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{(k_1 - k_2)(k_1 - k_3)(k_1 - k_4)(k_1 - k_5)} & -\frac{k_2 k_3 k_4}{(k_2 - k_3)(k_2 - k_4)(k_2 - k_5)} & \frac{k_4 k_3}{(k_3 - k_4)(k_3 - k_5)} & -\frac{k_4}{k_4 - k_5} & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Аналитическое выражение для обратной матрицы \underline{Z}^{-1} , полученное в соответствии с подходом, представленным в [21], имеет вид

$$\underline{Z}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{k_1 - k_2} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1 k_2}{(k_2 - k_3)(k_1 - k_3)} & \frac{k_2}{k_2 - k_3} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_1 k_2 k_3}{(k_1 - k_4)(k_2 - k_4)(k_3 - k_4)} & \frac{k_2 k_3}{(k_3 - k_4)(k_2 - k_4)} & \frac{k_3}{k_3 - k_4} & 1 & 0 \\ \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{(k_1 - k_5)(k_2 - k_5)(k_3 - k_5)(k_4 - k_5)} & \frac{k_2 k_3 k_4}{(k_2 - k_5)(k_3 - k_5)(k_4 - k_5)} & \frac{k_4 k_3}{(k_4 - k_5)(k_3 - k_5)} & \frac{k_4}{k_4 - k_5} & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Анализ матриц \underline{Z} и \underline{Z}^{-1} позволяет сформулировать алгоритм построения элементов этих матриц в общем случае для матриц любого размера $\dim(n \times n)$:

$$\begin{aligned} z_{i,j} &= z_{i,j}^{-1} = 0, & j > i; \\ z_{i,j} &= z_{i,j}^{-1} = 1, & j = i; \\ z_{i,j} &= \prod_{\omega=j}^{i-1} \frac{-k_{\omega}}{k_j - k_{\omega+1}}, & z_{i,j}^{-1} = \prod_{\omega=j}^{i-1} \frac{k_{\omega}}{k_{\omega} - k_i}, & j < i. \end{aligned} \quad (10)$$

Общие выражения (10) позволяют построить матрицы \underline{Z} и \underline{Z}^{-1} , которые необходимы для решения системы уравнений, описывающих распространение ХВ и продуктов его разложения в слое подземных вод.

Систему уравнений (4) с учетом выражения (7) можно представить в виде

$$L(\underline{\beta}) = \tilde{\underline{K}} \cdot \underline{\beta}, \quad (11)$$

где $\tilde{\underline{K}} = \underline{Z}^{-1} \cdot \underline{K} \cdot \underline{Z}$ – диагональная матрица, состоящая из констант скоростей химических реакций.

Запишем систему уравнений (1), описывающую превращения и миграцию химических веществ в подземных водах, в новых переменных $\underline{\beta}$ (для i -го вещества с учетом (2) и (7)):

$$L(\beta_i) = \frac{\partial \beta_i}{\partial t} - D_X \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial x^2} - D_Y \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial y^2} - D_Z \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial z^2} + v \frac{\partial \beta_i}{\partial x} = \tilde{k}_i \cdot \beta_i, \quad (12)$$

$$i = \overline{1, n}, \quad n = 5.$$

Выражение (12) представляет собой набор из n независимых уравнений. В литературе представлено значительное количество аналитических решений данного выражения при различных начальных и граничных условиях [17].

Аналитическое решение уравнения (12) может быть представлено в следующем виде [22]:

$$\beta_i(x, y, z, t) = \frac{\beta_i^0}{8} f_x(x, t) f_y(y, t) f_z(z, t), \quad (13)$$

где

$$f_x(x, t) = \left(\exp \left\{ \frac{x}{2\alpha_x} \left[1 - \left(1 + \frac{4k_i\alpha_x}{v} \right)^{1/2} \right] \right\} \operatorname{erf} \left\{ \frac{x - vt \left(1 + \frac{4k_i\alpha_x}{v} \right)^{1/2}}{2(\alpha_x t v)^{1/2}} \right\} \right),$$

$$f_y(y, t) = \left[\operatorname{erf} \left\{ \frac{y + \frac{Y}{2}}{2(\alpha_y x)^{1/2}} \right\} - \operatorname{erf} \left\{ \frac{y - \frac{Y}{2}}{2(\alpha_y x)^{1/2}} \right\} \right], \quad (14)$$

$$f_z(z, t) = \left[\operatorname{erf} \left\{ \frac{z + \frac{Z}{2}}{2(\alpha_z x)^{1/2}} \right\} - \operatorname{erf} \left\{ \frac{z - \frac{Z}{2}}{2(\alpha_z x)^{1/2}} \right\} \right],$$

где Y, Z – размеры источника по осям y, z соответственно, м; $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – коэффициенты дисперсивности ($\alpha_x = D_X/v, \alpha_y = D_Y/v, \alpha_z = D_Z/v$) по координатным осям x, y и z , м.

Аналитическое решение (13) справедливо при следующих предположениях: выполнении условий (2); скорость движения воды в порах почвы в направлении оси x постоянна; превращение ХВ в подземных водах описывается последовательными химическими реакциями первого порядка.

После того как получено аналитическое выражение для вектора $\underline{\beta}$ в преобразованной области решений, можно получить выражение вектора концентраций \underline{c} в первоначальной области с помощью уравнения (6).

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ДЕГРАДАЦИИ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

Для иллюстрации разработанного подхода проведем моделирование распространения продуктов деградации пестицидов в подземных водах, источником которых является полигон захоронения пестицидов «Большие Избищи», расположенный в Липецкой области. На полигоне захоронено примерно 1400 т ядохимикатов без применения противодиффузионных экранов

и существует потенциальная опасность загрязнения токсичными веществами подземных вод [23].

Под полигоном на глубине около 63 м расположен Задонско-Плавский водоносный горизонт, который является основным источником водоснабжения населения Липецкой, Орловской, Воронежской областей.

На полигоне создана сеть наблюдательных скважин. Скважины имеют различную глубину – около 20, 80 и 90 м.

Начиная с 2010 года, проводились наблюдения за качеством вод в скважинах. В течение всего периода наблюдений в пробах воды, отобранной на глубине 20 м, наблюдалось присутствие следующих хлорорганических соединений:

- 2-метил-4-хлорфеноксиуксусная кислота (гербицид 2М-4Х);
- метиловый эфир 2-метил-4-хлорфеноксиуксусной кислоты;
- изооктиловый эфир 2-метил-4-хлорфеноксиуксусной кислоты;
- 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота (гербицид 2,4-Д);
- бутиловый эфир 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты;
- 2-метил-4-хлорфенол;
- 2,4-дихлорфенол.

Очевидно, загрязнение воды на глубине 20 м обусловлено выщелачиванием вредных веществ из тела полигона под действием атмосферных осадков и распространением их вместе с потоком подземных вод. Согласно [24], в почве происходит постепенная деградация гербицида 2,4-Д, бутилового эфира 2,4-Д, а также гербицида 2М-4Х, метилового и бутилового эфира 2М-4Х. Процесс деградации проходит последовательно через стадии гидролиза исходных веществ и окисления продуктов реакций. Продуктами деградации данных веществ являются в том числе хлорфенолы, хлорпирокатехины, хлормуконовые кислоты [24].

В скважинах глубиной 80 и 90 м загрязняющих веществ не обнаружено.

3. ПРОВЕРКА КОРРЕКТНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Выполним математическое моделирование миграции гербицидов и продуктов их деградации в подземных водах на основе разработанного подхода. Проведем сравнение значений концентраций, полученных расчетным путем (прогнозных значений концентраций), с данными натурных наблюдений.

На рис. 1 показан график зависимости прогнозных значений концентрации 2М-4Х от времени в воде на глубине 20 м. Также на рис. 1 показаны значения концентраций вещества, полученные в результате натурных наблюдений.

Аналогичный график для 2-метил-4-хлорфенола (продукта деградации 2М-4Х) представлен на рис. 2.

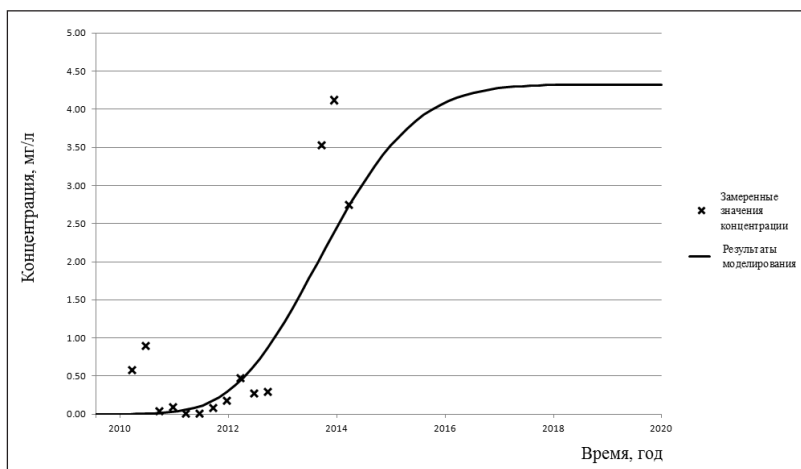


Рис. 1. Зависимость концентрации 2М-4Х от времени в подземных водах на глубине 20 м

Fig. 1. Time dependence of the concentration of MCPA in groundwater at a depth of 20 m

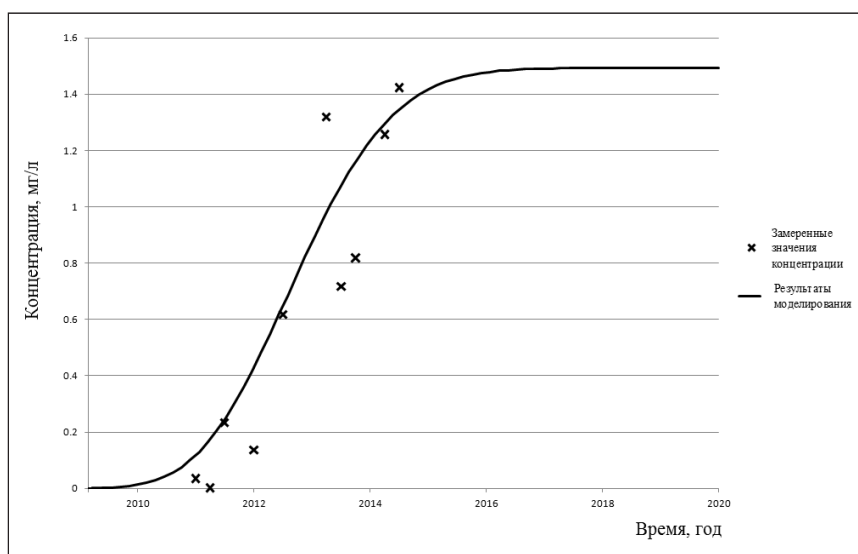


Рис. 2. Зависимость концентрации 2-метил-4-хлорфенола от времени в подземных водах на глубине 20 м

Fig. 2. Time dependence of the concentration of 2-methyl-4-chlorophenol in groundwater at a depth of 20 m

Как видно из рис. 1–2, результаты моделирования концентраций удовлетворительно согласуются с данными замеров концентраций веществ в скважине (натурными наблюдениями).

Коэффициент корреляции результатов моделирования и замеренных значений концентраций для 2М-4Х и 2-метил-4-хлорфенола в среднем составляет 0,91.

Относительная погрешность определения концентраций с помощью разработанного метода для 2М-4Х составляет 27,7 %, для 2-метил-4-хлорфенола – 15,0 %.

Таким образом, разработанный метод позволяет удовлетворительно описать динамику изменения концентрации вещества в подземных водах и может быть рекомендован для использования на практике.

4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПЕСТИЦИДОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ДЕГРАДАЦИИ В ВОДАХ, ДОСТИГАЮЩИХ ПИТЬЕВОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА

Важной задачей является оценка возможности загрязнения гербицидами и продуктами их деградации водоносного горизонта, являющегося основным источником водоснабжения населения.

С этой целью на основании разработанного подхода было проведено моделирование распространения гербицидов и продуктов их деградации от источника загрязнения (полигона захоронения пестицидов) в вертикальном направлении вниз по глубине грунта.

График изменения значений концентраций гербицида 2М-4Х, эфиров 2М-4Х и продуктов разложения данных веществ по глубине грунта представлен на рис. 3.

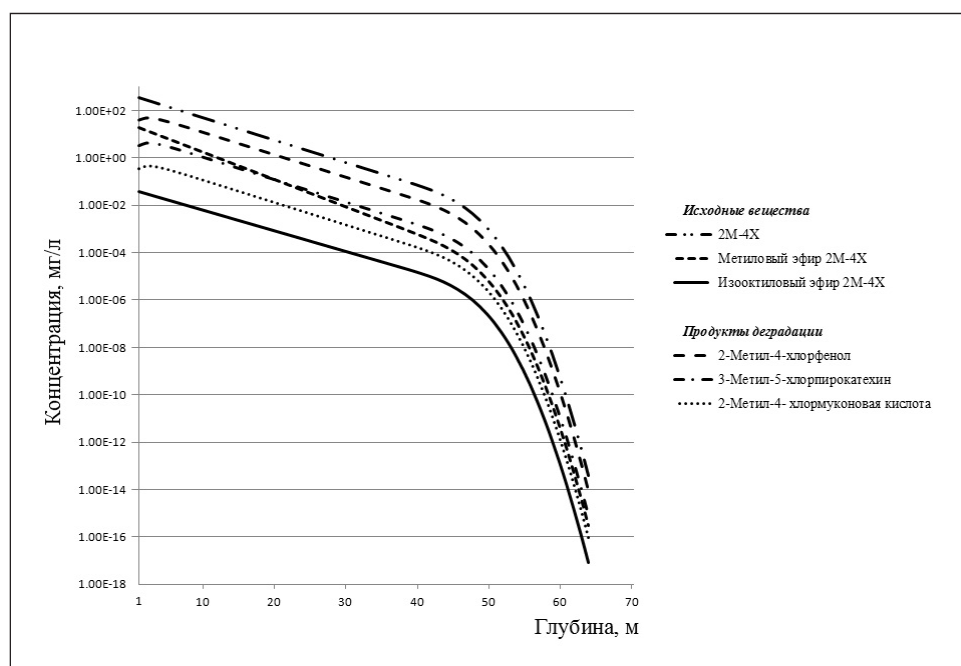


Рис. 3. Изменение значений концентраций гербицида 2М-4Х, эфиров 2М-4Х и продуктов разложения данных веществ по глубине грунта

Fig. 3. Concentration profiles of MCPA, esters of MCPA and their degradation products

График изменения значений концентраций гербицида 2,4-Д, бутилового эфира 2,4-Д и продуктов разложения данных веществ по глубине грунта представлен на рис. 4.

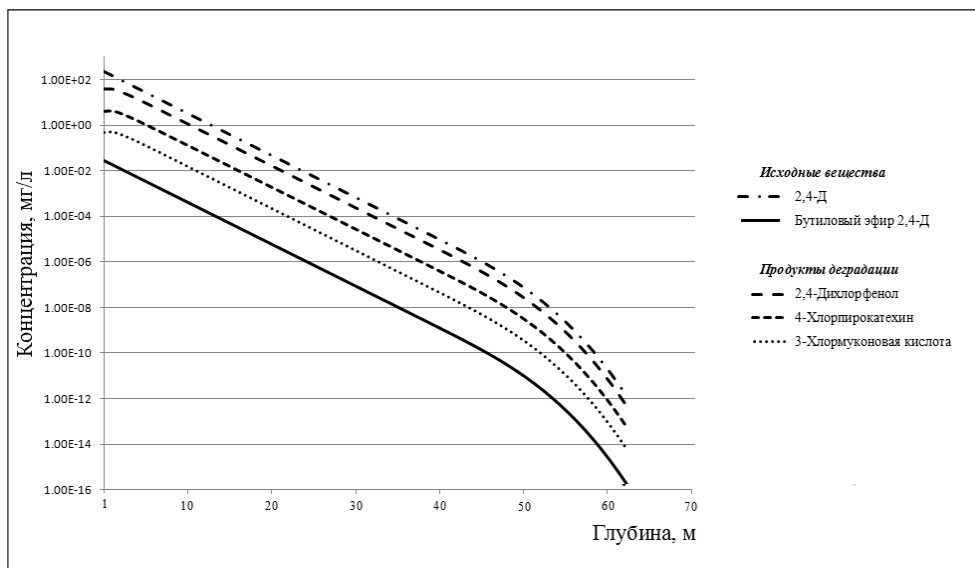


Рис. 4. Изменение значений концентраций гербицида 2,4-Д, бутилового эфира 2,4-Д и продуктов разложения данных веществ по глубине грунта

Fig. 4. Concentration profiles of 2,4-D, butyl esters of 2,4-D and their degradation products

Значения прогнозируемых концентраций гербицидов и продуктов их деградации в подземных водах, достигающих питьевого водоносного горизонта, расположенного на глубине 63 м, находятся в пределах $10^{-9} \dots 10^{-14}$ мг/л.

Следовательно, проведенные исследования показывают, что загрязнения питьевого горизонта гербицидами и продуктами их разложения не ожидается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан общий метод построения аналитического решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих миграцию и многостадийные превращения химических веществ в подземных водах по последовательным реакциям первого порядка в трехмерном пространстве. Для описания кинетики многостадийных превращений химических веществ по последовательным реакциям первого порядка использована теория матриц.

На основе разработанного метода выполнено моделирование распространения гербицидов и продуктов их деградации в подземных водах.

Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными натурных наблюдений.

Предложенный метод является полезным инструментом для исследования поведения сложных многокомпонентных химических систем в подземных водах и может быть рекомендован для применения на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хубларян В.Г. Водные потоки в различных средах. – М.: Геос, 2009. – 468 с.
2. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1984. – 262 с.
3. Путилина В.С. Миграция загрязняющих органических соединений в подземные воды // Геоэкология. – 2003. – № 4. – С. 309–317.
4. Крайнов С.Р. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии. – М.: Недра, 1988. – 254 с.
5. Bear J., Cheng A. Modeling groundwater flow and contaminant transport. – New York: Springer Publishing Company, 2010. – 834 p.
6. Roy J.W., Bickerton G. Toxic groundwater contaminants: an overlooked contributor to urban stream syndrome? // Environmental Science and Technology. – 2012. – Vol. 46 (2). – P. 729–736.
7. Kumar C.P. Groundwater modeling // Hydrological Developments in India since Independence. – Roorkee: National Institute of Hydrology, 1992. – P. 235–261.
8. Groundwater modeling. Remediation and Redevelopment Division resource materials. – Michigan: Department of Environmental Quality Remediation and Redevelopment Division, 2014.
9. Fundamentals of ground-water modeling. – Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, 1992.
10. Hromadka T.V. A review of groundwater contaminant transport modeling techniques // Environmental Modeling / ed. by P. Melli, P. Zannetti. – Dordrecht: Springer Netherlands, 1992. – P. 35–54.
11. Fetter C.W. Contaminant hydrogeology. – New York: MacMillan Publishing Company, 1993.
12. McDonald M.G., Harbaugh A.W. The history of MODFLOW // Ground Water. – 2003. – N 41 (2). – P. 280–283.
13. Karatzas G.P. Developments on modeling of groundwater flow and contaminant transport // Water Resources Management. – 2017. – Vol. 31, N 10. – P. 3235–3244.
14. Modeling of groundwater flow and contaminant transport in two-dimensional geometries in an unconfined aquifer / F. Dimane, I. Hanafi, A. El Himri, K. Haboubi, F.M. Cabrera, J.T. Manzanares // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1010–1012. – P. 1023–1027.
15. Karanovic M., Neville C.J., Andrews C.B. BIOSCREEN_AT: BIOSCREEN with an exact analytical solution // Ground Water. – 2007. – Vol. 45, N 2. – P. 242–245.
16. Crowe A.S., Shikaze S.G., Ptacek C.J. Numerical modelling of groundwater flow and contaminant transport to Point Pelee marsh, Ontario, Canada // Hydrological Processes. – 2004. – Vol. 18, N 2. – P. 293–314.
17. Гидрогеологические исследования за рубежом / под ред. Н.А. Маринова. – М.: Недра, 1982. – 428 с.
18. BIOCHLOR. Natural attenuation decision support system: user's manual. Version 1.0. – Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2000. – 54 p.
19. Genuchten M.Th. van. Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions // Computers and Geosciences. – 1985. – N 11 (2). – P. 129–147.
20. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Физматлит, 2010. – 560 с.
21. Каплан И.А. Практические занятия по высшей математике. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1960. – 228 с.
22. Domenico P.A. An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species // Journal of Hydrology. – 1987. – № 91. – P. 49–58.
23. Gilliom R.J. Pesticides in U.S. streams and groundwater // Environmental Science and Technology. – 2007. – N 41 (10). – P. 3408–3414.
24. Разложение гербицидов / под ред. П. Керни и Д. Кауфмана; пер. с англ. под ред. Н.Н. Мельникова. – М.: Мир, 1971. – 358 с.

Афанасьева Александра Алексеевна, кандидат технических наук, начальник отдела ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии». Основное направление научных исследований – математическое моделирование распространения токсичных химических веществ в окружающей среде, методология анализа риска для здоровья. Имеет более 20 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: alex.afanaseva@mail.ru.

Назаренко Денис Игоревич, кандидат технических наук, начальник отдела ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии». Основное направление научных исследований – математическое моделирование распространения токсичных химических веществ в окружающей среде, методология анализа аварийного риска, моделирование химико-технологических процессов. Имеет более 20 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: dir@gosniokht.ru

Швецова-Шиловская Татьяна Николаевна, доктор технических наук, профессор, начальник отделения ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии». Основное направление научных исследований – кинетика сложных химических реакций и планирование эксперимента, математическое моделирование распространения токсичных химических веществ в окружающей среде; методология оценки аварийного риска на опасных химических объектах. Имеет более 55 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: dir@gosniokht.ru.

Казарезова Елена Викторовна, младший научный сотрудник ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии». Основное направление научных исследований – математическое моделирование распространения токсичных химических веществ в окружающей среде, методология анализа и оценки аварийного риска. Имеет более 10 публикаций. E-mail: dir@gosniokht.ru.

Afanasyeva Aleksandra Alekseyevna, PhD (Eng.), department head at The State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology. Her research interests are focused on mathematical modeling of the toxic chemicals spread in the environment and on the health risk analysis methodology. She is the author of more 20 publications including 1 monograph. E-mail: alex.afanaseva@mail.ru

Nazarenko Denis Igorevich, PhD (Eng.), department head at The State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology. His research interests are focused on mathematical modeling of the toxic chemicals spread in the environment, the risk analysis methodology and modeling of chemical technology. He is the author of more 20 publications including 1 monograph. E-mail: dir@gosniokht.ru

Shvetzova-Shilovskaya Tatyana Nikolayevna, D.Sc (Eng.), professor, department head at The State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology. Her research interests are focused on kinetics of complex chemical reactions, mathematical modeling of the toxic chemicals spread in the environment, on the methodology of assessing accident risks at hazardous chemical facilities. She is the author of more 55 publications including 1 monograph. E-mail: dir@gosniokht.ru

Kazarezova Elena Victorovna, a junior research worker at the State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology. Her research interests are focused on mathematical modeling of the toxic chemicals spread in the environment and on the methodology of analysis and assessment of accident risks. She is the author of more 10 publications. E-mail: dir@gosniokht.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-7-20

Mathematical modeling of migration and multi-stage transformations of chemicals in groundwater*

A.A. AFANASYEVA, D.I. NAZARENKO, T.N. SHVETSOVA-SHILOVSKAYA, E.V. KAZAREZOVA

The State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology, 23 Shosse Entuziastov, Moscow, 111024, Russian Federation. E-mail: dir@gosniokht.ru

Abstract

Pollution of groundwater chemicals and products of degradation is one of important environmental problems. Methods for mathematical modeling are widely used to estimate the scales of groundwater's pollution. The mathematical model describing the distribution of the chemical

* Received 12 February 2019.

and an unlimited number of products of their degradation in groundwater is a system of differential equations in partial derivatives. Now numerical methods for solving such systems are widely known. The published analytical methods have many limitations.

The paper presents a general method for constructing an analytical solution of a system of differential equations describing the migration and multistage transformations of chemicals in groundwater by consecutive first-order reactions. The matrix theory is used to describe the kinetics of multistage transformations of chemicals.

Mathematical modeling of the distribution of pesticides and products of their degradation in groundwater is conducted for the Bolshie Izbishi landfill of pesticides located in the Lipetsk region. About 1,400 tons of toxic chemicals are buried in the landfill, and there is a potential risk of pollution of groundwater by toxic substances.

The aquifer is located under the landfill at a depth about 63 m. The aquifer is the main source of water supply of the population. The possibility of contamination with pesticides and products of their degradation for the aquifer was studied. Values of the predicted concentrations of pesticides and products of their degradation in groundwater reaching the aquifer are $10^{-9} \dots 10^{-14}$ mg/l.

The correctness of the proposed analytical method is confirmed by comparing the calculated values of concentrations with data of natural observations.

Keywords: groundwater, mathematical modeling, chemicals, degradation products, pesticides, herbicides, consecutive first-order reactions, turbulent diffusion equations, analytical method

REFERENCES

1. Khublaryan V.G. *Vodnye potoki v razlichnykh sredakh* [Water flows in various]. Moscow, Geos Publ., 2009. 468 p.
2. Gol'dberg V.M., Gazda S. *Gidrogeologicheskie osnovy okhrany podzemnykh vod ot zagryazneniya* [Hydrogeological basis for protection of groundwater from pollution]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 262 p.
3. Putilina V.S. Migratsiya zagryaznyayushchikh organicheskikh soedinenii v podzemnye vody [Migration of polluting organic compounds into groundwater]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya – Environmental Geoscience*, 2003, no. 4, pp. 309–317.
4. Krainov S.R. *Metody geokhimicheskogo modelirovaniya i prognozirovaniya v gidrogeologii*. Moscow, Nedra Publ., 1988. 254 p.
5. Bear J., Cheng A. Modeling groundwater flow and contaminant transport. New York, Springer Publishing Company, 2010. 834 p.
6. Roy J.W., Bickerton G. Toxic groundwater contaminants: an overlooked contributor to urban stream syndrome? *Environmental Science and Technology*, 2012, vol. 46 (2), pp. 729–736.
7. Kumar C.P. Groundwater modeling. *Hydrological Developments in India since Independence*. Roorkee, National Institute of Hydrology, 1992, pp. 235–261.
8. *Groundwater Modeling. Remediation and Redevelopment Division Resource Materials*. Michigan, Department of Environmental Quality Remediation and Redevelopment Division, 2014.
9. *Fundamentals of Ground-Water Modeling*. Washington, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, 1992.
10. Hromadka T.V. A review of groundwater contaminant transport modeling techniques. *Environmental Modeling*. Ed. by P. Melli, P. Zannetti. Dordrecht, Springer Netherlands, 1992, pp. 35–54.
11. Fetter C.W. *Contaminant hydrogeology*. New York, MacMillan Publishing Company, 1993.
12. McDonald M.G., Harbaugh A.W. The history of MODFLOW. *Ground Water*, 2003, no. 41 (2), pp. 280–283.
13. Karatzas G.P. Developments on modeling of groundwater flow and contaminant transport. *Water Resources Management*, 2017, vol. 31, no. 10, pp. 3235–3244.
14. Dimane F., Hanafi I., El Himri A., Haboubi K., Cabrera F.M., Manzanares J.T. Modeling of groundwater flow and contaminant transport in two-dimensional geometries in an unconfined aquifer. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1010–1012, pp. 1023–1027.

15. Karanovic M., Neville C.J., Andrews C.B. BIOSCREEN_AT: BIOSCREEN with an exact analytical solution. *Ground Water*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 242–245.
16. Crowe A.S., Shikaze S.G., Ptacek C.J. Numerical modelling of groundwater flow and contaminant transport to Point Pelee marsh, Ontario, Canada. *Hydrological Processes*, 2004, vol. 18, no. 2, pp. 293–314.
17. Marinov N.A., ed. *Gidrogeologicheskie issledovaniya za rubezhom* [Hydrogeological studies abroad]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 428 p.
18. *BIOCHLOR. Natural attenuation decision support system: user's manual*. Version 1.0. Washington, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2000. 54 p.
19. Genuchten M.Th. van. Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions. *Computers and Geosciences*, 1985, no. 11 (2), pp. 129–147.
20. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 560 p.
21. Kaplan I.A. *Prakticheskie zanyatiya po vysshei matematike* [Practical classes in higher mathematics]. Khar'kov, Kharkiv State University Publ., 1960. 228 p.
22. Domenico P.A. An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species. *Journal of Hydrology*, 1987, no. 91, pp. 49–58.
23. Gilliom R.J. Pesticides in U.S. streams and groundwater. *Environmental Science and Technology*, 2007, no. 41 (10), pp. 3408–3414.
24. Kearney P.C., Kaufman D., eds. *Degradation of herbicides*. New York, M. Dekker, 1969 (Russ. ed.: *Razlozhenie gerbitsidov*. Ed. by P. Kerni i D. Kaufman. Moscow, Mir Publ., 1971. 358 p.).

Для цитирования:

Математическое моделирование миграции и многостадийных превращений химических веществ в подземных водах / А.А. Афанасьева, Д.И. Назаренко, Т.Н. Швецова-Шиловская, Е.В. Казарезова // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-7-20.

For citation:

Afanasyeva A.A., Nazarenko D.I., Shvetsova-Shilovskaya T.N., Kazarezova E.V. Matematicheskoe modelirovanie migratsii i mnogostadiinykh prevrashchenii khimicheskikh veshchestv v podzemnykh vodakh [Mathematical modeling of migration and multi-stage transformations of chemicals in groundwater]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 7–20. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-7-20.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 550.8.053:681.3, 550.34.016, 550.34.037.2 DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-21-32

Автоматизация обработки индикаторных режимов работы нефтяных скважин в базе данных непрерывных записей поднасосных телеметрических систем на основе структурированных sql-запросов*

М.Н. ГАВРИЛОВ^{1,a}, Ю.М. КОНОНОВ^{2,b}, С.С. БРОНИК^{3,c}

¹ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 20, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

² 625003, РФ, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, Тюменский государственный университет

³ 634027, РФ, г. Томск, пр. Мира, 72, Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа

^a gavrilovmn@tpu.ru ^b yktom1@gmail.com ^c stanislavbronik@gmail.com

Ведение постоянного мониторинга добычи сопряжено с получением, обработкой и хранением огромного массива промысловых, промыслово-геофизических и промыслово-гидродинамических данных по опорной сети скважин. Последние десятилетия в промысловой геофизике и смежных методах мониторинга разработки на месторождениях Западной Сибири наблюдается стремительный рост объема получаемой информации о процессах, происходящих в системе «скважина–пласт» и околоскважинном пространстве. Опорные сети промыслово-геофизического и гидродинамического контроля за выработкой запасов на месторождении непрерывно растут (ввиду действия объективных факторов выбытия скважин из действующего фонда на поздних стадиях эксплуатации). А с 2011 года осуществляется переход на более технологичные методы прямой высокочастотной регистрации данных с применением технологий телеметрии в действующем фонде скважин (ТМС) с целью удовлетворения потребностей более широкого круга практических интересов, что обуславливает высокие темпы роста объема цифровых промысловых данных, характеризующиеся непрерывностью во временных рядах, и необходимость автоматизации повторяющихся элементов алгоритма экспертного анализа и интерпретации. Таким образом, не менее стремительно растет и количество запросов к цифровым данным. При небольших объемах данных и/или ограниченности временного ряда опытному эксперту не составляет труда извлечь из них полезную информацию. Но для эффективного использования объемных массивов данных и получения на этой основе качественно новых результатов актуальной является задача создания адекватных автоматизированных методов комплексного анализа и обработки. В этом случае автоматизированное извлечение полезной информации должно быть формализовано, происходить единообразно и объективно. Одной из

* Статья получена 28 февраля 2019 г.

важнейших проблем в рамках анализа непрерывных записей ТМС является распознавание периодов стабильной работы необходимого набора измерителей системы, выделение и классификация характерных режимов работы скважин на длинных одномерных и многомерных временных рядах физических наблюдений, распознавание аномальности события, разделение физических и технологических аномалий физического поля в скважине.

Ключевые слова: телеметрия скважин, база геофизических данных, алгоритм поиска, установившийся режим работы скважин, физическое измерение, поле давления в скважине, энергетическое состояние залежи, фильтрационно-емкостные свойства, структурированные запросы sql

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье рассматривается вопрос практической реализации в формате структурированных sql-запросов алгоритма предварительной обработки данных в базе физических измерений с применением ТМС в скважинах. Целью предварительной автоматизированной обработки стоит выделение временных интервалов соответствующих гидродинамическому исследованию нефтяных скважин на установившихся режимах (ИД) в процессе их эксплуатации и подготовка набора характеристик, подлежащих дальнейшему экспертному анализу и интерпретации.

Актуальность задачи обусловлена значительным объемом внедрения систем телеметрии скважин на месторождениях Западной Сибири, начиная с 2011 г., и соответствующим объемом накопленных непрерывных по времени данных физических измерений с высокой дискретизацией, особенно для месторождений на поздних стадиях разработки. При этом случайные и иные технологические события в процессе разработки месторождения должны были обеспечить условия для записи данных, характерных для специальных гидродинамических исследований скважин, достаточных для получения значимых характеристик для системы «скважина–пласт», без дополнительного простоя и соответствующих потерь по добыче, а соответственно и затрат на проведение таких исследований специализированной сервисной организацией.

Но ручной экспертный анализ такого объема данных представляет собой весьма трудоемкую задачу и практически неосуществим в реальных временных рамках реализации задач анализа истории разработки месторождения для фильтрационного моделирования и/или анализа выработки запасов. Таким образом, примененный формат структурированных sql-запросов на начальном этапе апробации автоматизированного алгоритма обработки непрерывных записей ТМС обоснован не только экономическими факторами, но и условием эксперимента – без специального создания условий исследования на скважине (исследование в режиме разработки), что подразумевало вероятность отсутствия характерных аномальных событий за анализируемый период и, как следствие, отсутствие необходимости в разработке более сложного интерфейса обработки.

В ходе эксперимента удалось подтвердить, что периодические и случайные технологические изменения режима работы скважин на одном из месторождений Западной Сибири позволяют регистрировать данные, похожие по условиям проведения гидродинамического исследования ИД. Регистрируемые ИД позволяют уменьшить потери добычи нефти на регулярные исследования и контролировать динамику пластового давления по залежи, проводить оценочные расчеты фильтрационно-емкостных свойств пласта.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основные задачи контроля разработки месторождений общеизвестны, к ним относятся оценка энергетического состояния продуктивного пласта, продуктивности скважин, ФЕС пласта и «совершенства» скважины. Однако фактический охват контрольными мероприятиями за каждый отдельно взятый период разработки по площади месторождения не всегда характеризуется достаточностью и равномерностью, особенно это свойственно для многопластовых месторождений Западной Сибири.

В свете вышесказанного встает вопрос о границах возможностей высокоточных ТМС как инструмента повышения информативности системы разработки месторождений и возможности повторного анализа архива записей ТМС с позиции перспектив выделения и интерпретации интервалов, схожих по технологическим условиям на специализированные гидродинамические исследования. Таким образом, для данного эксперимента задача такова: выделение в большом массиве значений текущего давления на приеме скважинного насоса характерных режимов системы «пласт–скважина», соответствующих установившемуся режиму, в ходе решения которой учитывались особенности и несоответствия дискретности измерений забойного давления и дебита скважины. Если давление может измеряться с дискретностью в сотни раз в секунду, то дебит на рассматриваемом месторождении измеряется раз в два часа (для большинства скважин с ТМС), а в некоторых – раз в сутки, что согласуется с требованием действующих нормативных документов, но значительно осложняет возможности формирования интерпретационного пакета данных. За основу был взят алгоритм, представленный специалистами ООО «БашНИПИнефть» (Инженерная практика № 10-11/2016), адаптированный к технологическим условиям рассматриваемого месторождения (рис. 1).

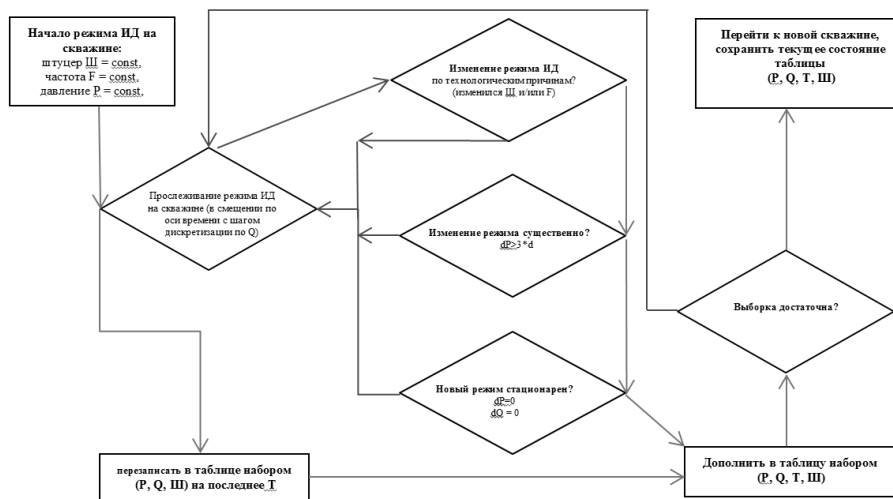


Рис. 1. Алгоритм автоматической обработки ИД с использованием непрерывных замеров забойного давления датчиками ТМС

Fig. 1. An algorithm for automatic processing of ID using continuous measurements of bottomhole pressure with TMS sensors

2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА В ВИДЕ SQL-ЗАПРОСОВ

Входные данные для запуска алгоритма – таблица промысловых замеров (база промысловых замеров); динамическими параметрами являются название (код) месторождения, скважины, дата (T), замер давления на приеме насоса (P) и почасовой дебит скважины (Q).

```

declare
    start_date      date_table := date_table();
    end_date        date_table := date_table();
    last_val        number_table := number_table();
    pres_val        number_table := number_table();
    prod_val        number_table := number_table();
    tmp_val         number;
    value_cnt       number;
    check_flag      number := 0;
    pressure_cnt    number;
    pressure_total  number;
    avg_pressure    number;
    prod_cnt        number;
    prod_total      number;
    avg_prod        number;
begin
    delete from IK_TEMP_TBL;
    commit;
    for cc in (select uwi,
                    oilfield_name,
                    oil_field_code,
                    well_name,
                    rec_date,
                    nvl(change_start, '&start') change_start,
                    nvl(change_end, '&end') - 1 change_end,
                    str,
                    nvl(next_str, str) next_str,
                    count(uwi) over(partition by uwi) cnt
                from (select uwi,
                            oilfield_name,
                            oil_field_code,
                            well_name,
                            rec_date,
                            lag(trunc(next_date, 'DD')) over(partition by
uwi order by rec_date) change_start,
                            next_date change_end,
                            str,
                            next_str
                        from (select uwi,
                                    s.oilfield_name,
                                    oil_field_code,
                                    s.well_name,
                                    trunc(rec_date, 'DD') rec_date,
                                    lead(trunc(rec_date, 'DD'))
over(partition by uwi order by rec_date) next_date,
                                    to_char(number_value) str,
                                    lead(to_char(number_value))
over(partition by uwi order by rec_date) next_str
                                from replicator.onyx_param_values s
                                where param_id = 36
                                and rec_date between '&start' and '&end'
                                and s.oil_field_code = 'MS0345'
                                and uwi = '3020016000'
                            )
                        where nvl(next_str, str + 1) <> str)
                    order by 1,4)
    loop
        value_cnt := 1;
        check_flag := 0;

```



```

for ccl in (select *
           from (select uwi,
                        s.oilfield_name,
                        s.well_name,
                        rec_date,
                        lead(rec_date, 1) over(partition by uwi order
by rec_date) next_date,
                        lead(rec_date, 2) over(partition by uwi order
by rec_date) next_date2,
                        lead(rec_date, 3) over(partition by uwi order
by rec_date) next_date3,
                        to_char(number_value) str,
                        lead(number_value, 1) over(partition by uwi
order by rec_date) next_str,
                        lead(number_value, 2) over(partition by uwi
order by rec_date) next_str2,
                        lead(number_value, 3) over(partition by uwi
order by rec_date) next_str3

```

Условие стационарности режима проверяется постоянством замеров дебита Q и давления P по скважине, с соблюдением технологических условий (постоянство частоты ЭЦН F и штуцера Ш) на протяжении не менее трех дискретных измерений с учетом аппаратурной погрешности. Если режим стационарен во времени T , то значения для интерпретационной таблицы перезаписываются на последнюю дату (до наступления изменений стационарности режима).

```

from replicator.onyx_param_values s
      where param_id = 184
      and rec_date between cc.change_start and
cc.change_end
      and s.oil_field_code = cc.oil_field_code
      and uwi = cc.uwi)
where (abs((str - next_str) / decode(str, 0, 0.0001, str))
< 0.05 and
      abs((str - next_str2) / decode(str, 0, 0.0001, str))
< 0.05 and
      abs(((str + next_str + next_str2) / 3) - next_str3)
/
      ((str + next_str + next_str2) / 3)) > 0.15)
      and str + next_str + next_str2 > 0
      order by rec_date)
loop
-- dbms_output.put_line(ccl.next_str2||';'|| last_val.count);
if value_cnt = 1
then
  last_val.extend;
  last_val(value_cnt) := ccl.next_str2;

  start_date.extend;
  start_date(value_cnt) := ccl.rec_date-1/12;

  end_date.extend;
  end_date(value_cnt) := ccl.next_date2+1/12;
  value_cnt := value_cnt + 1;
else
  for i in last_val.first..last_val.last
  loop
    -- dbms_output.put_line(ccl.next_str2||';'|| last_val.count);
    -- tmp_val := last_val(i);

    if ccl.next_str2 between last_val(i)-(last_val(i)*0.05) and
last_val(i)+(last_val(i)*0.05)
    then
      last_val.delete(i);
      last_val(i) := ccl.next_str2;

```

```

start_date.delete(i);
start_date(i) := cc1.rec_date-1/12;

end_date.delete(i);
end_date(i) := cc1.next_date2+1/12;

check_flag := 1;
end if;
-- dbms_output.put_line((last_val(i)-
(last_val(i)*0.05))||';'||(last_val(i)+(last_val(i)*0.05))||';'||
cc1.next_str2||';'|| last_val.count||';'|| value_cnt);
end loop;

```

В случае наступления изменений стационарности режима проверяется существенность изменения (троекратное превышение аппаратурной погрешности) и наступление другого стационарного режима. В случае выполнения условий интерпретационная таблица пополняется новым набором данных, в случае случайности события и/или его несущественности алгоритм возвращается к поиску стационарного режима (в текущем времени записи с шагом максимальной дискретизации).

```

if check_flag = 0
then
last_val.extend;
last_val(value_cnt) := cc1.next_str2;

start_date.extend;
start_date(value_cnt) := cc1.rec_date-1/12;

end_date.extend;
end_date(value_cnt) := cc1.next_date2+1/12;
value_cnt := value_cnt + 1;
/*last_val.extend;
last_val(value_cnt) := cc1.next_str2;
value_cnt := value_cnt + 1;*/
end if;
check_flag := 0;
-- dbms_output.put_line(cc1.next_str2||';'|| last_val.count);
end if;
-- exit when last_val.count = 3;

end loop; --End of cc1 loop

pressure_total := 0;
prod_total := 0;
if last_val.count >= 3
then
for i in last_val.first..last_val.last
loop
pressure_cnt := 0;
prod_cnt := 0;
avg_pressure := 0;
--
dbms_output.put_line(cc.uwi||';'||cc.change_start||';'||cc.change_end||';'||
start_date(i)||' - '||end_date(i)||';'||last_val.count);
select count(uwi), avg(str) into pressure_cnt, avg_pressure
from (select uwi,
s.oilfield_name,
s.well_name,
rec_date,
lead(rec_date, 1) over(partition by uwi order by
rec_date) next_date,
lead(rec_date, 2) over(partition by uwi order by
rec_date) next_date2,
to_char(number_value) str,

```

```

        lead(to_char(number_value), 1) over(partition by uwi
order by rec_date) next_str,
        lead(to_char(number_value), 2) over(partition by uwi
order by rec_date) next_str2
    from replicator.onyx_param_values s
    where param_id = 196
        and rec_date between start_date(i) and end_date(i)
        and s.oil_field_code = cc.oil_field_code
        and uwi = cc.uwi)
    where (abs((str - next_str)/decode(str, 0, 0.0001, str)) < 0.05 and
abs((str - next_str2)/decode(str, 0, 0.0001, str)) < 0.05);
    -- dbms_output.put_line(pressure_cnt);

    pres_val.extend;
    pres_val(i) := avg_pressure;

    select count(uwi), avg(number_value) into prod_cnt, avg_prod
    from replicator.onyx_param_values s
    where param_id = 11
        and rec_date between start_date(i) and end_date(i)
        and s.oil_field_code = cc.oil_field_code
        and uwi = cc.uwi
        and s.number_value > 0;

    prod_val.extend;
    prod_val(i) := avg_prod;

    if pressure_cnt > 0
    then pressure_total := pressure_total + 1;
    end if;

    if prod_cnt > 0
    then prod_total := prod_total + 1;
    end if;

    --
        and str > 0 and next_str > 0 and next_str2 > 0;
    -- dbms_output.put_line(prod_cnt);
    end loop; -- edn last_val loop
end if;

    if pressure_total = last_val.count and prod_total = last_val.count and
last_val.count >= 3
    then
        for i in last_val.first..last_val.last
        loop
            insert into IK_TEMP_TBL(UWI, OILFIELD_NAME, WELL_NAME, FITTING,
FREQUENCY, END_DATE, PRESSURE, LIQ_DB)
            val-
            ues(cc.uwi,cc.oilfield_name,cc.well_name,cc.str,last_val(i),end_date(i),roun
d(pres_val(i),2), round(prod_val(i),2));
            end loop;
        commit;
    end if;

    last_val.Delete;
    start_date.Delete;
    end_date.Delete;
    pres_val.Delete;
    prod_val.Delete;

    end loop;
end;

--select * from IK_TEMP_TBL

```

Выход из цикла осуществляется при выполнении условия накопления достаточного набора данных (3 записи) для обработки ИД. При этом цикл переходит к анализу временных рядов следующей скважины.

Результаты предварительного анализа данных ТМС на одном из месторождений Западной Сибири представлены в таблице.

Результаты предварительной обработки непрерывных записей ТМС

Results of preliminary processing of TMS continuous records

Номер скважины	Штуцер	Частота	Дата, время	Давление	Дебит
1014	18	50	14.01.2011 16:00	100	44.8
1014	18	5.3	17.01.2011 17:00	92.25	53.3
1014	18	53	20.01.2011 15:00	92	49.5
1040	20	59.5	11.08.2013 17:50	221.4	12.4
1040	20	45.6	22.08.2013 16:17	221.17	25.2
1040	20	50	25.08.2013 11:56	236	18.3
1387	18	41.72	16.12.2016 16:00	159	53.5
1387	18	1	16.04.2017 6:40	44.8	3.13
1387	18	50	03.05.2017 22:42	45.61	3.47

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ АЛГОРИТМИЗИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ

График $P_{\text{заб}} = f(Q)$ на рис. 2 показывает, что в скважине 1387 нарушается условие снижения забойного давления при возрастающих отборах, и эти результаты из дальнейшей обработки исключены. Результат не характеризует условия исследования на установившихся режимах.

В скважинах 1014 и 1040 с разной степенью достоверности аппроксимационным методом определяется пластовое давление 141 и 275 атм соответственно. Определения согласуются с результатами прямых замеров энергетического состояния пластов в этих скважинах. Результаты предварительной обработки непрерывных записей ТМС для скважин 1014 и 1040 соответствуют условиям специального гидродинамического исследования на установившихся режимах.

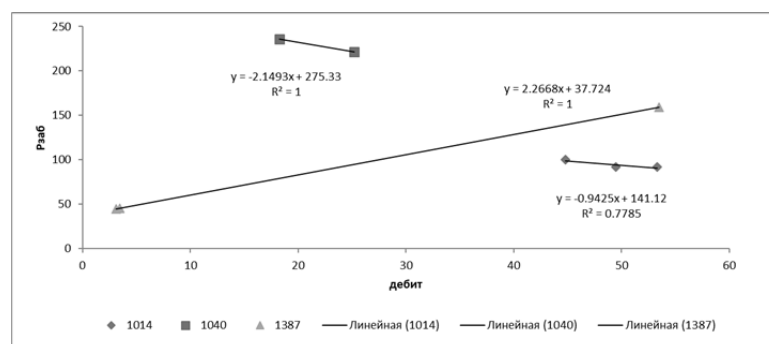


Рис. 2. График $P_{\text{заб}} = f(Q)$

Fig. 2. Graph $P_{\text{zab}} = f(Q)$

Индикаторные диаграммы (рис. 3) удовлетворяют минимальным требованиям к представительности выборки, построены за короткий период установления режима (без значительного изменения по составу притока и технологических условий на скважине), поэтому могут быть рекомендованы для оценки коэффициента продуктивности объекта разработки на дату исследования и оценки фильтрационно-емкостных параметров пласта в зоне дренирования при наличии достоверных данных о составе притока и его вязкостных характеристиках.

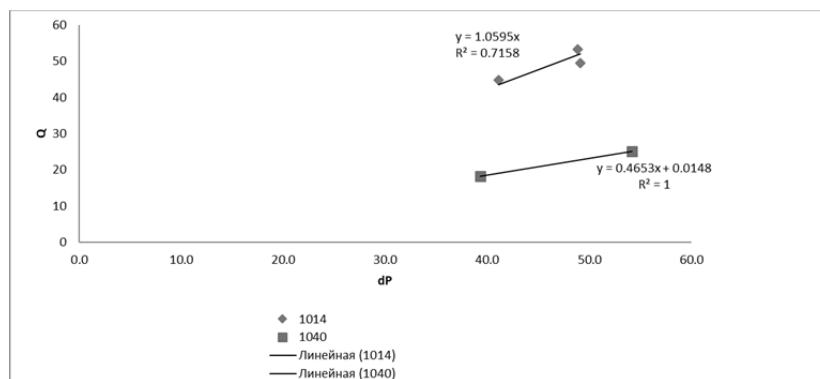


Рис. 3. Индикаторные диаграммы скважин 1014, 1040

Fig. 3. Indicator diagrams of wells 1014, 1040

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практический опыт применения алгоритма автоматизированной обработки непрерывных записей ТМС с целью выявления в архивных данных условий, схожих со специализированными ГДИС на многопластовом месторождении нефти Западной Сибири, показал следующее:

- 1) индикаторные диаграммы в короткие периоды становления режима на скважине могут присутствовать в непрерывных записях ТМС за историю разработки без искусственного создания условий исследования;
- 2) регистрация ИД по ТМС позволяет уменьшить потери добычи нефти на обеспечение регулярных исследований;
- 3) оперативная обработка ИД по ТМС позволяет контролировать динамику пластового давления и расширять тем самым опорную сеть;
- 4) ФЕС пласта при оперативной оценке ИД по ТМС носит качественный характер и является функцией большого числа входных переменных;
- 5) решение о фактической пригодности для интерпретации выделенных фрагментов непрерывных записей ТМС остается за экспертом-обработчиком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров В.Н. Контроль разработки нефтяных месторождений Республики Башкортостан системами ТМС // Инженерная практика. – 2016. – № 10–11.
2. Феофилактов С.В., Кузнецов А.В. Новые надежные ТМС с резервированием // Инженерная практика. – 2019. – № 1–2.

3. Богословский К.Е. Результаты ОПИ высокотемпературных ТМС на добывающих скважинах с SAGD // Инженерная практика. – 2018. – № 10.
4. Якиметов В.А. Реализация единого протокола ТМС и единых технических требований к системам погружной телеметрии // Инженерная практика. – 2018. – № 10.
5. Чмырь А.В. Опыт применения системы мониторинга и управления IWELL для эксплуатации мехфонда // Инженерная практика. – 2018. – № 11.
6. Ткачев С.В. Система удаленного мониторинга, диагностики и автоматизированного управления АМВІТ // Инженерная практика. – 2018. – № 11.
7. Петрушин Е.О., Арутюнян А.С. Гидродинамические исследования скважин на установившихся режимах // Аспирант. – 2015. – № 4. – С. 179–184.
8. Семенякин В.С., Сонных А.А. Анализ двучленного квадратичного уравнения для обработки данных ГДИС на установившихся режимах // Газовая промышленность. – 2009. – № 3.
9. Гасумов Р.А., Толпаев В.А., Ахмедов К.С. Методика обработки гидродинамических исследований скважин // Нефтепромысловое дело. – 2011. – № 3. – С. 8–11.
10. Повышев К.И., Борхович С.Ю., Мирсаатов О.М. Совершенствование гидродинамических методов исследования скважин // Нефтепромысловое дело. – 2006. – № 12.
11. Марченко Д.А. Анализ результатов гидродинамических исследований скважин // Концепция устойчивого развития науки в современных условиях: материалы конференции. – Самара, 2018.
12. Толпаев В.А., Винниченко И.А. Усовершенствованная методика обработки данных гидродинамических исследований скважин на стационарных режимах // Газовая промышленность. – 2012. – № 11.
13. Николаев Д.О., Нестеренко А.Н. Особенности интерпретации ГДИС в условиях ультранизкой проницаемости // Академический журнал Западной Сибири. – 2016. – № 5.
14. Пасечник М.П. Системный опыт ОАО «Газпромнефть – Ноябрьскнефтегазгеофизика» в информационном обеспечении цифровых моделей на основе газодинамических исследований скважин // Каротажник. – 2012. – № 9.
15. Азаматов А.А. Оценка степени снижения коэффициента продуктивности скважин вследствие деформации коллектора // Нефтепромысловое дело. – 2011. – № 4.

Гаврилов Михаил Николаевич, старший преподаватель отделения геологии Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – определение геологической информативности геофизических исследований, оптимизация комплекса ГИС. E-mail: gavrilmn@tpu.ru

Кононов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент Политехнической школы Тюменского государственного университета. Основное направления научных исследований – управление процессом на основе подходов системного анализа. E-mail: ykto1@gmail.com

Броник Станислав Сергеевич, инженер-программист АО «ТомскНИПИнефть». Основное направление научных исследований – оптимизация бизнес процессов с применением принципов алгоритмизации и автоматизации. E-mail: stanislavbrnik@gmail.com

Gavrilov Mikhail Nikolaevich, senior lecturer, Department of Geology, National Research Tomsk Polytechnic University. The main areas of his research are the determination of the geological information content of geophysical studies, optimization of the logging complex. E-mail: gavrilmn@tpu.ru

Kononov Yuri Mikhailovich, PhD (Eng.). The main areas of his research are process management based on systems analysis approaches. E-mail: ykto1@gmail.com

Bronik Stanislav Sergeevich, software engineer AO Tomsk NIPi нефть. The main field of is research is optimization of business processes using the principles of algorithmization and automation. E-mail: stanislavbrnik@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-21-32

Automation of processing of indicator modes of oil wells in the database of continuous records of sub-pump telemetry systems based on structured sql queries*M.N. GAVRILOV^{1,a}, Yu.M. KONONOV^{2,b}, S.S. BRONIK^{3,c}¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 20 Lenina Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation² University of Tyumen, 6, Volodarskogo Street, Tyumen, 625003, Russian Federation³ Tomsk Oil and Gas Design and Research Institute, 72, Mira Prospekt, Tomsk, 634027, Russian Federation^a gavrilovmn@tpu.ru ^b yktom1@gmail.com ^c stanislavbronik@gmail.com**Abstract**

Continuous monitoring of production is associated with production, processing and storage of a huge array of field, field geophysical and field hydrodynamic data on the wellbore network. The last decades in field geophysics and related methods of monitoring the development of fields in Western Siberia have seen a rapid growth in the volume of information received about the processes occurring in the well-reservoir system and near the well space. The reference networks of the geophysical and hydrodynamic control over the development of reserves at the field are not only continuously growing (due to the effect of objective factors on the disposal of wells from the existing fund in the later stages of operation). And since 2011, the transition to more sophisticated methods of direct high-frequency data recording using telemetry technologies in the existing well stock (TMS) is being carried out in order to meet the needs of a wider range of practical interests. This leads to high growth rates of digital field data, characterized by continuity in time series, and the need to automate the repetitive elements of the expert analysis and interpretation algorithm. Thus, the number of requests for digital data is growing no less rapidly. With small amounts of data, and / or limited time series, an experienced expert is not difficult to extract useful information from them. But for the effective use of volumetric data sets and obtaining qualitatively new results on this basis, the task of creating adequate automated methods of complex analysis and processing is an urgent task. In this case, the automated extraction of useful information should be formalized, occur uniformly and objectively. One of the most important problems in the analysis of TMS continuous records is the recognition of periods of stable operation of the required set of system meters, the identification and classification of typical modes of operation of wells for long one-dimensional and multidimensional time series of physical observations, recognition of the event anomaly, separation of physical and technological anomalies of the physical field in the well.

Keywords: borehole telemetry, geophysical data base, search algorithm, well established operating mode, physical measurement, well pressure field, reservoir energy state, reservoir properties, structured queries-sql

REFERENCES

1. Fedorov V.N. Kontrol' razrabotki neftyanykh mestorozhdenii respubliki Bashkortostan sistemami TMS [Monitoring the development of oil fields in the republic of bashkortostan by tms systems]. *Inzhenernaya praktika – Oilfield engineering*, 2016, no. 10–11.
2. Feofilaktov S.V., Kuznetsov A.V. Novye nadezhnye TMS s rezervirovaniem [New reliable redundant TMS]. *Inzhenernaya praktika – Oilfield engineering*, 2019, no. 1–2.
3. Bogoslovskii K.E. Rezul'taty OPI vysokotemperaturnykh TMS na dobyvayushchikh skvazhinakh s SAGD [The results of the high-temperature TMS OPI in production wells with SAGD]. *Inzhenernaya praktika – Oilfield engineering*, 2018, no. 10.
4. Yashmetov V.A. Realizatsiya edinogo protokola TMS i edinykh tekhnicheskikh trebovaniy k sistemam pogruzhnoi telemekhniki [Implementation of a unified TMS protocol and common technical

* Received 28 February 2019.

requirements for submersible telemetry systems]. *Inzhenernaya praktika – Oilfield engineering*, 2018, no. 10.

5. Chmyr' A.V. Opyt primeneniya sistemy monitoringa i upravleniya IWELL dlya ekspluatatsii mekhfonda [Experience in using the IWELL monitoring and control system for the operation of the mechanical fund]. *Inzhenernaya praktika – Oilfield engineering*, 2018, no. 11.

6. Tkachev S.V. Sistema udalennogo monitoringa, diagnostiki i avtomatizirovannogo upravleniya AMBIT [AMBIT remote monitoring, diagnostics and automated control system]. *Inzhenernaya praktika – Oilfield engineering*, 2018, no. 11.

7. Petrushin E.O., Arutyunyan A.S. Gidrodinamicheskie issledovaniya skvazhin na ustanovivshikhsya rezhimakh [Hydrodynamics' studies of the bore holes on formed mode]. *Aspirant*, 2015, no. 4, pp. 179–184. (In Russian).

8. Semenyakin V.S., Sonnykh A.A. Analiz dvuchlennogo kvadrachnogo uravneniya dlya obrabotki dannykh GDIS na ustanovivshikhsya rezhimakh [Analysis of the two-term quadratic equation for processing well test data GDIS in steady-state modes]. *Gazovaya promyshlennost' – GAS Industry of Russia*, 2009, no. 3. (In Russian).

9. Gasumov R.A., Tolpaev V.A., Ahmedov K.S. Metodika obrabotki gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin [Technique of data processing of wells hydrodynamic studies]. *Neftepromyslovoe delo – Oilfield engineering*, 2011, no. 3.

10. Povyshchey K.I., Borkhovich S.Yu., Mirsaetov O.M. Sovershenstvovanie gidrodinamicheskikh metodov issledovaniya skvazhin [Improving the hydrodynamic methods of well research]. *Neftepromyslovoe delo – Oilfield engineering*, 2006, no. 12.

11. Marchenko D.A. [Analysis of the results of hydrodynamic studies of wells]. *Kontseptsiya ustoychivogo razvitiya nauki v sovremennykh usloviyakh: materialy konferentsii* [International scientific-practical conference of the Concept of sustainable development of science in modern conditions]. Samara, 2018. (In Russian).

12. Tolpaev V.A., Vinnichenko I.A. Usovershenstvovannaya metodika obrabotki dannykh gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin na statsionarnykh rezhimakh [Improved methodology for processing data from hydrodynamic studies of wells in stationary modes]. *Gazovaya promyshlennost' – GAS Industry of Russia*, 2012, no. 11. (In Russian).

13. Nikolaev D.O., Nesterenko A.N. Osobennosti interpretatsii GDIS v usloviyakh ul'tranizkoi pronitsaemosti [Features of interpretation of GDIS under the conditions of ultra-low permeability]. *Akademicheskii zhurnal Zapadnoi Sibiri – Academic journal of West Siberia*, 2016, no. 5.

14. Pasechnik M.P. Sistemnyi opyt OAO "Gazpromneft" – Noyabr'skneftegazgeofizika" v informatsionnom obespechenii tsifrovyykh modelei na osnove gazodinamicheskikh issledovaniy skvazhin [System experience of Gazpromneft-novemberneftegasgeophysics jsc in information support of digital models based on gas-dynamic researches of wells]. *Karotazhnik*, 2012, no. 9. (In Russian).

15. Azamatov A.A. Otsenka stepeni snizheniya koeffitsienta produktivnosti skvazhin vsledstvie deformatsii kollektora [Assessment of decrease level of well productivity coefficient due to collector deformation]. *Neftepromyslovoe delo – Oilfield engineering*, 2011, no. 4.

Для цитирования:

Гаврилов М.Н., Кононов Ю.М., Броник С.С. Автоматизация обработки индикаторных режимов работы нефтяных скважин в базе данных непрерывных записей поднасосных телеметрических систем на основе структурированных sql-запросов // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 21–32. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-21-32.

For citation:

Gavrilov M.N., Kononov Yu.M., Bronik S.S. Avtomatizatsiya obrabotki indikatorykh rezhimov raboty neftyanykh skvazhin v baze dannykh nepreryvnykh zapisei podnasosnykh telemetricheskikh sistem na osnove strukturirovannykh sql-zaprosov [Automation of processing of indicator modes of oil wells in the database of continuous records of sub-pump telemetry systems based on structured sql-queries]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 21–32. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-21-32.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 681.5.865.8

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-33-56

Аналитический синтез исполнительных систем микророботов в условиях неопределенности*

А.Р. ГАЙДУК^{1,a}, С.Г. КАПУСТЯН^{2,b}

¹ 347922, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет

² 344006, РФ, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, Южный научный центр Российской академии наук

^a gaiduk_2003@mail.ru ^b kap56@mail.ru

В последние годы для решения различных задач всё более широко применяются роботы различных типов, в том числе и микророботы. В связи с этим задача разработки систем управления исполнительного уровня микророботов становится весьма актуальной. Особенно остро эта проблема встает в тех случаях, когда порядок и параметры подвижных элементов микророботов – объектов управления – являются априори неопределенными и могут изменяться в процессе эксплуатации. Для управления такими микророботами на исполнительном уровне наиболее целесообразно применять адаптивные системы с идентификацией. Известные методы решения задачи адаптивного управления чаще всего ориентированы на случай, когда порядок объекта известен и не изменяется.

Ниже предлагается новый метод решения задачи синтеза адаптивного управления микророботами в условиях неопределенности, в основе которого лежит марковский метод идентификации и метод аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям. Отличительной особенностью марковского метода идентификации является применение марковских параметров не непрерывного объекта, а марковских параметров виртуального дискретно-подобного объекта, являющегося совокупностью дискретных объектов различных порядков. При этом установлены условия разрешимости задачи идентификации микророботов этим методом. Метод аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям обеспечивает синтез управлений минимальной сложности за счет согласования полюсов замкнутой системы с нулями и полюсами полного объекта; также обеспечиваются порядки астатизма и прямые показатели качества не хуже заданных. Эти свойства достигаются за счет использования стандартных нормированных передаточных функций. Эффективность предложенного подхода подтверждается результатами компьютерного моделирования.

* Статья получена 15 февраля 2019 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18–58–00051, № 17–29–07054, № 16–29–04194 и № 18–07–00637, а также в рамках реализации Программы фундаментальных исследований РАН по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом РАН, № 7 «Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники», № гр. проекта АААА-А18-118020190041-1).

Разработанный подход может применяться для создания в условиях неопределенности как адаптивных исполнительных систем микророботов, так и адаптивных систем управления объектами промышленного, сельскохозяйственного производства, а также для решения специальных задач, в том числе задач управления в социальной сфере.

Ключевые слова: микроробот, объект, идентификация, марковские параметры, система управления, синтез, управление по выходу и воздействиям

ВВЕДЕНИЕ

Роботы, и в частности микророботы, применяются для решения всё более широкого круга задач. При этом происходит непрерывное повышение требований к качеству их систем управления. Решение задачи синтеза этих систем требует наличия математических моделей управляемых элементов роботов. Однако последние часто являются неопределенными из-за изменений свойств как роботов, так и микророботов в процессе эксплуатации, что обуславливает необходимость применения адаптивных систем управления [1–7]. Современные адаптивные системы с моделью или системы прямого адаптивного управления ориентированы на случай, когда изменяются параметры, а порядок неопределенного объекта не изменяется с течением времени [8, 9]. В этом плане более эффективными являются адаптивные системы управления с идентификацией, так как они могут применяться и при изменении порядка микророботов в некоторые моменты времени. Такие, по существу, самоорганизующиеся системы создаются с применением цифровых средств автоматизации и нуждаются в алгоритмическом и программном обеспечении специального типа. Это обеспечение может быть создано с применением только аналитических методов идентификации моделей микророботов и синтеза систем управления ими [7, 10–13].

К настоящему времени разработано достаточно много алгоритмов как идентификации объектов, так и синтеза систем управления [5–16], однако большая часть из них ориентирована, во-первых, на одномерные системы, а во-вторых, на применение «вручную». Кроме того, эти методы часто не учитывают дискретность цифровых методов обработки информации.

Одним из наиболее ранних аналитических методов идентификации, по-видимому, является метод Б. Хо [14]. Этот метод разработан в середине XX века и использует свойства марковских параметров динамических систем. Однако он не получил широкого применения, так как ориентирован на использование импульсных переходных функций, которые являются реакцией объектов на дельта-функции, формирование которых практически невозможно.

Известен также аналитический метод идентификации, который базируется на решении уравнения Винера–Хопфа [15]. Однако в этом методе предполагается применение статистической обработки данных, поэтому процесс идентификации этим методом имеет большую длительность. Эта особенность в значительной степени осложняет его применение в системах микророботов.

Существуют методы идентификации неопределенных объектов, представляющие собой процедуру совместного оценивания переменных состояния и параметров, в основе которых лежит алгоритм обобщенного филь-

тра Калмана–Бьюси [13, 14]. Но и в этом случае, как правило, порядок управляемых объектов предполагается известным. Идентификацию и порядка, и параметров объекта можно осуществить, используя наблюдатель, применяемый в самоорганизующемся оптимальном регуляторе с экстраполяцией (СОРЭ) А.А. Красовского [10]. Однако этот наблюдатель строится на основе цепочек интеграторов различных порядков без обратных связей, что снижает эффективность этого наблюдателя, поскольку реальные объекты, в том числе и микророботы, всегда содержат внутренние обратные связи.

В ряде работ применяется метод активной идентификации на основе специальных номограмм, которые строятся заранее экспериментальным путем [16]. При этом предполагается, что порядки и объекта, и системы не изменяются; заранее известны интервалы изменения параметров системы. Эти факторы существенно сужают область применения данного метода активной идентификации в исполнительных системах микророботов.

При адаптивном управлении с идентификацией математическая модель микроробота, необходимая для создания алгоритма управления, формируется в реальном времени путем подачи на него специальных пробных воздействий и фиксации его реакции [8, 11, 12, 15, 16]. Это приводит к необходимости оперативной обработки большого объема данных и решения значительного числа задач. За короткое время эти задачи могут быть решены только вычислительными средствами с высокой производительностью, что требует разработки специальных методов идентификации и синтеза, ориентированных на цифровую реализацию [10, 17].

В настоящей статье предлагается аналитический метод синтеза адаптивных исполнительных систем управления с идентификацией для микророботов в условиях неопределенности. Идентификацию предлагается проводить с применением марковских параметров, являющихся инвариантами динамических систем [17, 18]. Как известно, для экспериментального определения марковских параметров непрерывных объектов необходимо многократное дифференцирование выходных переменных, что практически невозможно. С целью преодоления этой сложности предлагается определять марковские параметры не непрерывных микророботов, а некоторых виртуальных дискретных объектов. Этим обеспечиваются значительные преимущества предлагаемого подхода, так как марковские параметры указанных дискретных объектов могут быть легко найдены по значениям реакций микророботов на постоянные воздействия без дифференцирования. Эта особенность данного подхода позволяет идентифицировать неопределенные микророботы в автоматическом режиме и в реальном времени. При этом синтез исполнительных систем проводится на основе получаемых моделей с применением принципа управления по выходу и воздействиям [19, 20]. Предлагаемый метод ориентирован на цифровую обработку экспериментальных данных и позволяет распараллелить как идентификацию, так и синтез и значительно уменьшить длительность переходных процессов адаптивных систем управления за счет использования многопроцессорных вычислительных средств [17].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предположим, некоторый управляемый элемент микроробота (УЭМР) с несколькими каналами вход-выход описывается уравнениями

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = c^T x + d^T u, \quad (1)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния размерности n ; $u \in R^m$ – вектор управлений; $y \in R^1$ – выходная переменная этого элемента; A, B, c, d – числовые матрицы и векторы соответствующих размерностей [3, 17, 19]. Порядок УЭМР n и параметры его модели (1) заранее неизвестны и могут претерпевать скачкообразные изменения, оставаясь затем неизменными в течение достаточно длительного интервала времени. Причем во всех случаях УЭМР (1) является полным, а его порядок $n \leq n_{\max} - 1$, где n_{\max} – заранее известное значение [7, 9]. Выходная управляемая переменная $y = y(t)$ доступна измерению. Пробные воздействия имеют вид: $u_i(t) = u_{i0}1(t)$, $u_j(t) = 0$, $j \neq i$, $i, j = [1, m]$, значения $u_{i0} = \text{const}$ малы и допустимы.

Задача состоит в разработке метода цифровой идентификации текущей модели УЭМР (1) и синтеза адаптивного цифрового регулятора на основе этой модели. Идентификация должна осуществляться по результатам измерения реакции УЭМР на пробные воздействия. Адаптивный цифровой регулятор (АдЦР) должен быть физически реализуемым. Он должен обеспечивать заданные порядки астатизма к внешним воздействиям и прямые показатели качества замкнутой системы управления не хуже заданных [20, 21].

Переходя к решению поставленной задачи, введем вспомогательные определения. Пусть T_n – период дискретизации управляемой переменной $y = y(t)$ при идентификации, а $y_{ik} = y_i(kT_n)$ – дискретные значения отклонения переменной $y(t)$ объекта (1) на пробные воздействия $u_i(t) = u_{i0}1(t)$ при всех $i = [1, m]$ и $x(0) = x_0 = 0$.

2. ДИСКРЕТНО-ПОДОБНЫЙ ОБЪЕКТ

Рассмотрим сначала предлагаемый метод идентификации. Имея в виду цифровую обработку данных, введем виртуальный дискретно-подобный объект, соответствующий УЭМР (1), следующим образом.

Допустим, имеется совокупность систем уравнений различных порядков:

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{A}\tilde{x}_k + \tilde{B}\tilde{u}_k, \quad \tilde{y}_k = \tilde{c}^T \tilde{x}_k + \tilde{d}^T \tilde{u}_k. \quad (2)$$

Здесь $\tilde{x}_k = [\tilde{x}_{1k} \ \tilde{x}_{2k} \ \dots \ \tilde{x}_{vk}]^T$ и $\tilde{u}_k = [\tilde{u}_{1k} \ \tilde{u}_{2k} \ \dots \ \tilde{u}_{mk}]^T$ – векторы отклонений переменных состояния и дискретных управлений, а \tilde{y}_k – вектор отклонений \tilde{y}_{ik} выходной переменной $y(t)$, $i = [1, m]$, вызванных m -вектором \tilde{u}_k ,

$k = 0, 1, 2, \dots$, от соответствующих значений в установившемся режиме; $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{c}, \tilde{d}$ – числовые матрицы и векторы соответствующих размерностей виртуальных систем (2), порядок которых $\nu = [1, n_{\max}]$.

Пусть при $\tilde{x}_0 = 0$ и всех $t = kT_n$ выполняются условия:

$$\tilde{u}_{ik} = u_{i0}, \quad \tilde{y}_{ik} = y_{ik}, \quad i = [1, m], \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Определение 1. Объект, описываемый системой уравнений (2), называется «дискретно-подобным объектом», соответствующим непрерывному УЭМР (1), если выполняются условия (3).

Подчеркнем, что дискретно-подобный объект (ДПО) (2), соответствующий приведенному определению, как и СОРЭ А.А. Красовского [9], включает n_{\max} систем уравнений (2) различных порядков $\nu = [1, n_{\max}]$ [16, 17, 20].

Виртуальный объект (2) возникает в результате рассмотрения непрерывного пробного воздействия $u_i(t) = u_{i0}1(t)$ (как последовательности прямоугольных импульсов) длительностью T_n и амплитудой u_{i0} . Поэтому передаточные функции (ПФ) $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n)$ и $W_{yu_i}(s)$ каждого канала $\tilde{u}_i \rightarrow \tilde{y}$ ДПО и $u_i \rightarrow y$ УЭМР связаны в силу условий (3) Z_T -преобразованиями:

$$\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n, \tilde{n}_i) = Z_T \{W_{yu_i}(s)\} \quad \text{и} \quad W_{yu_i}(s) = Z_T^{-1} \{\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n, \tilde{n}_i)\}, \quad n_i = \tilde{n}_i, \quad (4)$$

где \tilde{n}_i, n_i – степени знаменателей ПФ $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n, \tilde{n}_i)$ и $W_{yu_i}(s)$ соответственно; $i = [1, m]$.

Отметим, что функции «с2d» и «d2c» с расширением «'zoh'» пакета MATLAB осуществляют оба преобразования (4) [22]. Однако при наличии «левых» полюсов у элемента (1) и при некоторых значениях T_n информация о некоторых из этих полюсов теряется при формировании ДПО (2), и поэтому возможность идентификации такого элемента (1) на основе ДПО (2) исключается. В связи с этим вводится следующее определение. Пусть $\tilde{\eta}_0^{\tilde{n}_i}$ – свободный коэффициент знаменателя ПФ $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n, \tilde{n}_i)$, а $\tilde{\Delta}_0$ – погрешность вычислений на используемой ЭЦВМ.

Определение 2. Если период дискретизации $T_n = T_n^\circ$, и ПФ $\tilde{\Theta}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n^\circ, \nu)$ такова, что

$$\tilde{\eta}_0^{\tilde{n}_i} \gg \tilde{\Delta}_0, \quad (5)$$

то ДПО (2) при $T_n = T_n^\circ$ является корректным. В противном случае, т. е. при $\tilde{\eta}_0^{\tilde{n}_i} \ll \tilde{\Delta}_0$, этот ДПО является некорректным [16, 17, 20].

3. МАРКОВСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

В случае многомерных дискретных объектов типа (2) вводятся либо $1 \times m$ -матрицы марковских параметров $\tilde{\Pi}^\zeta = [\tilde{\mu}_1^\zeta \ \tilde{\mu}_2^\zeta \ \dots \ \tilde{\mu}_m^\zeta]$ формулами:

$$\tilde{\Pi}^0 = \tilde{d}^T, \quad \tilde{\Pi}^\zeta = \tilde{c}^T \tilde{A}^{\zeta-1} \tilde{B}, \quad \zeta = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

либо марковские параметры $\tilde{\mu}_i^\zeta$ каждого канала $\tilde{u}_i \rightarrow \tilde{y}$ аналогичными выражениями:

$$\tilde{\mu}_i^0 = \tilde{d}_i, \quad \tilde{\mu}_i^\zeta = \tilde{c}^T \tilde{A}^{\zeta-1} \tilde{b}^i, \quad \zeta = 1, 2, \dots \quad (7)$$

где \tilde{d}_i – элементы вектора-строки \tilde{d}^T ; \tilde{b}^i – столбцы $n \times m$ -матрицы \tilde{B} ; $i = [1, m]$ [17, 18].

Система уравнений (2) является дискретной, поэтому вектор \tilde{y}_k ее выходных переменных определяется выражениями:

$$\tilde{y}_0 = \tilde{c}^T \tilde{x}_0 + \tilde{\Pi}^0 \tilde{u}_0, \quad \tilde{y}_k = \tilde{c}^T \tilde{A}^k \tilde{x}_0 + \sum_{j=0}^k \tilde{\Pi}^{k-j} \tilde{u}_j, \quad k = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Из выражений (8) с учетом $\tilde{x}_0 = 0$ и условий (3) выводим соотношения, которые определяют $1 \times m$ -матрицы $\tilde{\Pi}^\zeta$ марковских параметров:

$$\tilde{\Pi}^0 = \begin{bmatrix} y_{10} & y_{20} & \dots & y_{m0} \\ u_{10} & u_{20} & \dots & u_{m0} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\Pi}^\zeta = \begin{bmatrix} y_{1\zeta} & y_{2\zeta} & \dots & y_{m\zeta} \\ u_{1\zeta} & u_{2\zeta} & \dots & u_{m\zeta} \end{bmatrix} - \sum_{j=0}^{\zeta-1} \tilde{\Pi}^j, \quad \zeta = 1, 2, \dots \quad (9)$$

Марковские параметры $\tilde{\mu}_i^\zeta$ ДПО (2) определяются аналогичными выражениями:

$$\tilde{\mu}_i^0 = y_{i0} / u_{i0}, \quad \tilde{\mu}_i^\zeta = y_{i\zeta} u_{i0}^{-1} - \sum_{j=0}^{\zeta-1} \tilde{\mu}_i^j, \quad \zeta = 1, 2, \dots, \quad (10)$$

где $i = [1, m]$.

Соотношения (9), (10) позволяют найти любое число N_μ $1 \times m$ -матриц $\tilde{\Pi}^\zeta$ или марковских параметров $\tilde{\mu}_i^\zeta$ каждого канала $\tilde{u}_i \rightarrow \tilde{y}$ виртуальной системы (2), используя экспериментальные дискретные значения отклонений y_{ik} УЭМР и значения u_{i0} , $i = [1, m]$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Подчеркнем, что в соответствии с определением ДПО значения входных и выходных переменных всех виртуальных систем (2) одни и те же, независимо от их порядка $v = [1, n_{\max}]$. Поэтому все векторы $\tilde{\Pi}^\zeta$ и все марковские

параметры $\tilde{\mu}_i^\zeta$, $i = [1, m]$, $\zeta = 0, 1, 2, \dots$ тоже одни и те же для всех n_{\max} виртуальных систем (2), соответствующих непрерывному УЭМР (1).

Передачная $1 \times m$ -матрица системы (2) v -го порядка [18, 19] определяется выражением:

$$\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}}(z, v) = \tilde{A}^{-1}(z, v) \left\{ \tilde{c}^T \operatorname{adj}(zE_v - \tilde{A}) \tilde{B} + \tilde{d}^T \tilde{A}(z, v) \right\}, \quad (11)$$

где $\operatorname{adj}(zE_v - \tilde{A})$ – присоединенная матрица, а полином

$$\tilde{A}(z, v) = \det(zE_v - \tilde{A}) = \tilde{\eta}_v^v z^v + \tilde{\eta}_{v-1}^v z^{v-1} + \dots + \tilde{\eta}_1^v z + \tilde{\eta}_0^v, \quad \tilde{\eta}_v^v = 1. \quad (12)$$

Как известно, присоединенная $v \times v$ -матрица определяется выражением [23, с. 88]

$$\begin{aligned} & \operatorname{adj}(zE - \tilde{A}) = \\ & = \tilde{\eta}_v^v E z^{v-1} + \left(\tilde{\eta}_v^v \tilde{A} + \tilde{\eta}_{v-1}^v E \right) z^{v-2} + \dots + \left(\tilde{\eta}_v^v \tilde{A}^{v-1} + \tilde{\eta}_{v-1}^v \tilde{A}^{v-2} + \dots + \tilde{\eta}_1^v E \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Подставив выражение (13) в (11) и учтя равенства (6), получим

$$\begin{aligned} \tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}}(z, v) = & \tilde{A}^{-1}(z, v) \left\{ \tilde{\eta}_v^v \tilde{\Pi}^0 z^v + \left(\tilde{\eta}_v^v \tilde{\Pi}^1 + \tilde{\eta}_{v-1}^v \tilde{\Pi}^0 \right) z^{v-1} + \right. \\ & \left. + \left(\tilde{\eta}_v^v \tilde{\Pi}^2 + \tilde{\eta}_{v-1}^v \tilde{\Pi}^1 + \tilde{\eta}_{v-2}^v \tilde{\Pi}^0 \right) z^{v-2} + \right. \\ & \left. + \dots + \left(\tilde{\eta}_v^v \tilde{\Pi}^v + \tilde{\eta}_{v-1}^v \tilde{\Pi}^{v-1} + \tilde{\eta}_{v-2}^v \tilde{\Pi}^{v-2} + \dots + \tilde{\eta}_1^v \tilde{\Pi}^1 + \tilde{\eta}_0^v \tilde{\Pi}^0 \right) \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Выражение (14) определяет передачную $1 \times m$ -матрицу многомерной системы (2) v -го порядка. Из этого выражения следует, что $v + 1$ матриц Π^ζ (6) или марковских параметров μ_i^ζ , $\zeta = \overline{0, v}$ системы (2) и v коэффициентов $\tilde{\eta}_\rho^v$, $\rho = \overline{0, v-1}$ характеристического полинома (12) полностью определяют все передаточные $1 \times m$ -матрицы $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}}(z, T_i, v)$, так как $\tilde{\eta}_v^v = 1$.

Но передаточная $1 \times m$ -матрица $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}}(z, T_i, v)$ (11) может быть разложена в ряд:

$$\begin{aligned} & \tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}}(z, T_i, v) = \\ & = \tilde{A}^{-1}(z, v) \left\{ \tilde{G}_v^v z^v + \tilde{G}_{v-1}^v z^{v-1} + \dots + \tilde{G}_1^v z + \tilde{G}_0^v + \tilde{G}_{-1}^v z^{-1} + \tilde{G}_{-2}^v z^{-2} + \dots \right\}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\tilde{G}_\rho^v = [\gamma_{i,\rho}^v]$ – $1 \times m$ -матрицы постоянных коэффициентов. Сравнение выражений (14) и (15) приводит к равенствам:

$$\tilde{G}_{v-\rho}^v = \sum_{\zeta=0}^{\rho} \tilde{\eta}_{v+\zeta-\rho}^v \tilde{\Pi}^\zeta, \quad \rho = 0, 1, 2, \dots, v-1, v, v+1, \dots \quad (16)$$

В частности, матрица $\tilde{G}_0^v = \tilde{\eta}_0^v \tilde{\Pi}^0 + \tilde{\eta}_1^v \tilde{\Pi}^1 + \dots + \tilde{\eta}_{v-1}^v \tilde{\Pi}^{v-1} + \tilde{\eta}_v^v \tilde{\Pi}^v$.

На основе выражений (14) и (15) заключаем, что элементы $\gamma_{i,j}^v$ $1 \times m$ -матриц $\tilde{G}_j^v = [\gamma_{i,j}^v]$ (16) при $j = [0, v]$ и $i = [1, m]$ фактически являются коэффициентами числителей скалярных передаточных функций $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_{\text{и}}, v)$ каналов $\tilde{u}_i \rightarrow \tilde{y}$ виртуальных систем (2) порядка v . Эти функции имеют вид

$$\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_{\text{и}}, v) = \frac{\tilde{\gamma}_{i,0}^v + \tilde{\gamma}_{i,1}^v z + \dots + \tilde{\gamma}_{i,v}^v z^v}{\tilde{\eta}_{i,0}^v + \tilde{\eta}_{i,1}^v z + \dots + \tilde{\eta}_{i,v-1}^v z^{v-1} + z^v}, \quad (17)$$

а сами функции $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_{\text{и}}, v)$ являются элементами передаточной $1 \times m$ -матрицы $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}}(z, T_{\text{и}}, v)$ (11). Отметим, что степени полиномов в выражении (17) могут быть меньше v в частных случаях.

В тех случаях, когда передаточная $1 \times m$ -матрица $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}}(z, T_{\text{и}}, v) \neq 0$, то в равенстве (15), как минимум, одна из $1 \times m$ -матриц $\tilde{G}_j^v \neq 0$, $j \in [0, v]$, и все $1 \times m$ -матрицы $\tilde{G}_j^v \equiv 0$ при $j = -1, -2, \dots$. Поэтому из выражений (14), (15) и (17) следует система алгебраических уравнений

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Pi}^{\beta+1} & \tilde{\Pi}^{\beta+2} & \dots & \tilde{\Pi}^{\beta+v} \\ \tilde{\Pi}^{\beta+2} & \tilde{\Pi}^{\beta+3} & \dots & \tilde{\Pi}^{\beta+v+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\Pi}^{\beta+v} & \tilde{\Pi}^{\beta+v+1} & \dots & \tilde{\Pi}^{\beta+2v-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\eta}_0^v \\ \tilde{\eta}_1^v \\ \vdots \\ \tilde{\eta}_{v-1}^v \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \tilde{\Pi}^{\beta+v+1} \\ \tilde{\Pi}^{\beta+v+2} \\ \vdots \\ \tilde{\Pi}^{\beta+2v} \end{bmatrix}, \quad \beta \in [0, \beta_{\max}], \quad (18)$$

а также система равенств

$$\tilde{G}_v^v = \tilde{\Pi}^0, \quad \tilde{G}_{v-j}^v = \tilde{\Pi}^j + \sum_{\zeta=0}^{j-1} \tilde{\eta}_{v+\zeta}^v \tilde{\Pi}^\zeta, \quad j = [1, v-1], \quad (19)$$

определяющих $1 \times m$ -матрицы \tilde{G}_j^v .

Порядок идентифицируемого непрерывного УЭМР (1) может быть определен по значению определителя матрицы из системы (18) при различных значениях v и β . Однако размер этой матрицы может быть довольно большим, поэтому вычислить его практически сложно, особенно учитывая

ограниченные возможности микроботов. В связи с этим более целесообразной представляется оценка непосредственно скалярных передаточных функций $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n, \nu)$ каналов $\tilde{u}_i \rightarrow \tilde{y}$. При этом порядок n УЭМР (1) оценивается по оценкам \hat{n}_i степеней знаменателей ПФ $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n, \nu)$ ДПО (2). Эти оценки вычисляются по формулам:

$$\hat{n}_i = \max \left\{ \nu \mid \tilde{\delta}_i^\nu \neq 0 \right\}, \quad \tilde{\delta}_i^\nu = \det \tilde{M}_i^{\beta, \nu}, \quad (20)$$

где

$$\tilde{M}_i^{\beta, \nu} = \begin{bmatrix} \tilde{\mu}_i^{\beta+1} & \tilde{\mu}_i^{\beta+2} & \dots & \tilde{\mu}_i^{\beta+\nu} \\ \tilde{\mu}_i^{\beta+2} & \tilde{\mu}_i^{\beta+3} & \dots & \tilde{\mu}_i^{\beta+\nu+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\mu}_i^{\beta+\nu} & \tilde{\mu}_i^{\beta+\nu+1} & \dots & \tilde{\mu}_i^{\beta+2\nu-1} \end{bmatrix}, \quad \nu = [1, m_{\max}], \quad \beta \in [0, \beta_{\max}]. \quad (21)$$

Учитывая ограниченные возможности вычислительных средств микроботов оценки коэффициентов знаменателя передаточной функции $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n, \nu)$ (17) при $\nu = \hat{n}_i$, ДПО целесообразнее вычислять не по (18), а по вытекающим из этого сложного матричного выражения формулам:

$$\tilde{\eta}_i^{\hat{n}_i} = - \left(\tilde{M}_i^{\beta, \hat{n}_i} \right)^{-1} \tilde{\Upsilon}_i^{\beta, \hat{n}_i}, \quad (22)$$

где

$$\tilde{\eta}_i^{\hat{n}_i} = \left[\tilde{\eta}_{i,0}^{\hat{n}_i} \quad \tilde{\eta}_{i,1}^{\hat{n}_i} \quad \dots \quad \tilde{\eta}_{i,\hat{n}_i-1}^{\hat{n}_i} \right]^T; \quad (23)$$

$$\tilde{\Upsilon}_i^{\beta, \hat{n}_i} = \left[\tilde{\mu}_i^{\beta+\hat{n}_i+1} \quad \tilde{\mu}_i^{\beta+\hat{n}_i+2} \quad \dots \quad \tilde{\mu}_i^{\beta+\hat{n}_i+\hat{n}_i} \right]^T.$$

По той же причине оценки коэффициентов $\tilde{\gamma}_{i,\rho}^\nu$ числителя передаточной функции ДПО (17) при $\nu = \hat{n}_i$ вычисляются по формулам:

$$\tilde{\gamma}_{i,j}^{\hat{n}_i} = \tilde{\mu}_i^{\hat{n}_i-j} + \sum_{\zeta=0}^{\hat{n}_i-1-j} \tilde{\mu}_i^{\zeta} \tilde{\eta}_i^{j+\zeta}, \quad \rho = \overline{0, \hat{n}_i-1}, \quad \hat{\gamma}_{i,\hat{n}_i}^{\hat{n}_i} = \tilde{\mu}_i^0. \quad (24)$$

В выражениях (18)–(24) $i = [1, m]$, а β может принимать любое значение из интервала $[0, \beta_{\max}]$. После определения численных значений коэффициентов $\tilde{\eta}_{i,\rho}^{\hat{n}_i}$ и $\tilde{\gamma}_{i,j}^{\hat{n}_i}$ они подставляются в выражение (17) при $\nu = \hat{n}_i$, а полученная передаточная функция $\tilde{W}_{\tilde{y}\tilde{u}_i}(z, T_n, \hat{n}_i)$ подвергается обратному Z_T -преобразованию. В результате получается искомая передаточная функция $\hat{W}_{yu_i}(s) =$

$= \hat{B}_i(s) / \hat{A}_i(s)$ канала $u_i \rightarrow y$ УЭМР. Затем описанные операции повторяются для остальных его каналов.

Матрицы $\tilde{M}_i^{\beta, \nu}$ (21) можно представить с учетом (6) следующим образом:

$$\tilde{M}_i^{\beta, \nu} = \begin{bmatrix} \tilde{c}^T \\ \tilde{c}^T \tilde{A} \\ \vdots \\ \tilde{c}^T \tilde{A}^{\nu-1} \end{bmatrix} \tilde{A}^\beta \begin{bmatrix} b^i & \tilde{A}b^i & \dots & \tilde{A}^{\nu-1}b^i \end{bmatrix}, \quad i = [1, m]. \quad (25)$$

Из выражений (20) и (25) следует, что если $\beta = 0, 1, 2, \dots$ и $\det \tilde{M}_i^{\beta, \nu}$ при некотором ν^* не равен нулю, а при $\nu = \nu^* + 1$ равен нулю, то полная часть канала $\tilde{y}_i \rightarrow \tilde{y}$ ДПО имеет порядок $\tilde{n}_i = \nu^*$. Причем определитель матрицы $\tilde{M}_i^{\beta, \nu}$ пропорционален $\det \tilde{A}$, если $\beta \neq 0$, поэтому равенство (22) применимо при этом условии, если только $\det \tilde{A} \neq 0$. Это неравенство соответствует, очевидно, условию корректности ДПО (5) по отношению к идентифицируемому УЭМР (1), так как оно выполняется только при соответствующем значении периода дискретизации $T_{\text{и}}^\circ$ его выходных переменных.

Отдельные каналы даже полных многомерных УЭМР типа (1) или ДПО типа (2) могут быть неполными [7, 19, 24]. Поэтому в общем случае оценку \hat{n} порядка идентифицируемого полного УЭМР целесообразно определять по степени его характеристического полинома, пользуясь следующими соотношениями:

$$\hat{A}(s) = \text{НОК}_{i=[1, m]} \{ \hat{A}_i(s) \}, \quad \hat{n} = \deg \hat{A}(s), \quad (26)$$

где $\hat{A}_i(s)$ – знаменатели полученных по выражению (4) оценок $\hat{W}_{yu_i}(s) = \hat{B}_i(s) / \hat{A}_i(s)$. Тогда оценку искомой передаточной $1 \times m$ -матрицы $W_{yu}(s)$ неопределенного УЭМР (1) можно оценить, пользуясь выражением

$$\hat{W}_{yu}(s) = \hat{A}^{-1}(s) [\hat{B}_1(s) \hat{Q}_1(s) \dots \hat{B}_m(s) \hat{Q}_m(s)], \quad (27)$$

где $\hat{Q}_{yu_i}(s) = \hat{A}(s) / \hat{A}_i(s)$, $i = [1, m]$.

Порядок применения к неопределенному УЭМР марковского алгоритма идентификации, вытекающего из приведенных выражений, будет показан ниже на численном примере. Этот алгоритм позволяет идентифицировать как одноканальные, так и многоканальные УЭМР и другие объекты, причем идентификацию отдельных каналов многомерных объектов можно осуществлять параллельно. Только выражения (26) и (27) реализуются совместно. Распараллеливание процесса идентификации позволяет значительно сократить его длительность за счет применения вычислительных средств, ориентированных на параллельную обработку информации.

Адаптивную систему управления многомерным неопределенным УЭМР с числом управлений, равным числу управляемых переменных, целесообразно синтезировать с применением декомпозирующего управления. Это управление позволяет создавать адаптивные регуляторы сепаратных каналов $u_i \rightarrow y_i$, $i = [1, m]$ как для одномерных, так и для многомерных объектов, но с учетом требуемых влияний на y_i других управлений u_j , $j \neq i$ [24]. В связи с этим метод аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ) [5,19, 20] для наглядности излагается здесь применительно к двухканальному УЭМР с одной управляемой переменной.

4. ЗАДАЧА СИНТЕЗА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Предположим, в результате идентификации некоторого УЭМР изложенным выше методом получена передаточная 1×2 -матрица $W_{yu}(s)$ типа (27). Эта матрица была подвергнута прямому Z_T -преобразованию (4) при $T = T_y \gg T_{и}$, в результате чего получено уравнение

$$\bar{A}(z)y(z) = \bar{B}(z)u(z) + \bar{F}(z)f(z), \quad (28)$$

где $y(z)$, $u(z)$ и $f(z)$ – z -изображения управляемой переменной, управления и внешнего неизмеряемого возмущения микроробота; $\bar{A}(z)$, $\bar{B}(z)$, $\bar{F}(z)$ – некоторые полиномы с известными значениями коэффициентов, причем полиномы $\bar{A}(z)$ и $\bar{B}(z)$ не имеют общих множителей.

Метод АССУВВ ориентирован на применение принципа «управления по выходу и воздействиям», поэтому уравнение адаптивного цифрового регулятора (АдЦР) для УЭМР (28) имеет вид

$$R(z)u(z) = Q(z)g(z) - L(z)y(z), \quad (29)$$

где $g(z)$ – z -изображение задающего воздействия; $R(z)$, $Q(z)$, $L(z)$ – искомые полиномы. Как видно, выход и задающее воздействие УЭМР подаются на АдЦР (29) в соответствии с принятым принципом управления, а возмущение f не подается, так как не измеряется. Величина

$$\mu_{цр} = \min \{r - q, r - l\}, \quad (30)$$

где $r = \deg R(z)$, $q = \deg Q(z)$, $l = \deg L(z)$, называется относительным порядком АдЦР [20]. Полиномы $R(z)$, $Q(z)$, $L(z)$ должны удовлетворять условию физической реализуемости

$$\mu_{цр} \geq \mu_{цр}^*, \quad (31)$$

где $\mu_{цр}^*$ – допустимое значение $\mu_{цр}$. Обычно $\mu_{цр}^* = 1$ или $\mu_{цр}^* = \tau_{зап} / T_y$, где $\tau_{зап}$ – суммарное запаздывание по времени в измерительной системе и в цифровом регуляторе.

Замкнутая система (28), (29) должна иметь заданные порядки астатизма ζ_g^* и ζ_f^* по задающему воздействию g и по возмущению f ; длительность переходного процесса не более $t_{\text{пн}}^*$, с; перерегулирование не более σ^* , %, и степень устойчивости не хуже $\beta^* < 1$ [20, 21].

5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Условие на степень устойчивости синтезируемой системы

$$\beta_{\text{сис}} = \left(1 - \max_j |z_j| \right) > \beta^*, \quad (32)$$

где z_j – корни ее характеристического полинома, определяет на комплексной плоскости область Ω – допустимого расположения корней этого полинома. Полином $\bar{A}(z)$ из уравнения УЭМР (28) факторизуется относительно границы области Ω : $\bar{A}(z) = \bar{A}_{\Omega}(z)\bar{A}_{\bar{\Omega}}(z)$, где полином $\bar{A}_{\Omega}(z)$ включает все корни полинома $\bar{A}(z)$, удовлетворяющие условию (32), а $\bar{A}_{\bar{\Omega}}(z) = \bar{A}(z) / \bar{A}_{\Omega}(z)$, причем $\det \bar{A}(z) = n_{\bar{A}}$, $\det \bar{A}_{\Omega}(z) = n_{\Omega}$, а $\det \bar{A}_{\bar{\Omega}}(z) = n_{\bar{\Omega}}$.

Пусть в уравнении (28) $\bar{B}(z)$ является числом или полиномом степени ϑ , все корни которого удовлетворяют условию (32), т. е. $\bar{B}(z) = \beta_{\vartheta}$ или $\bar{B}(z) = \beta_{\vartheta} \prod_{j=1}^{\vartheta} (z - z_j^{\bar{B}})$. Другими словами, $\bar{B}(z) = \bar{B}_{\Omega}(z)$. В этом случае характеристический полином синтезируемой системы берется в виде $D(z) = \bar{A}_{\Omega}(z)B_0(z)\tilde{D}(z)$, где $B_0(z) = \beta_{\vartheta}^{-1}\bar{B}(z)$, а $\tilde{D}(z)$ – некоторый полином, причем $\tilde{D}(z) = \tilde{D}_{\Omega}(z)$ [20].

В общем случае полиномы $\bar{A}(z)$ и $\bar{F}(z)$ из (28) могут иметь вид $\bar{A}(z) = (z-1)^{n_{\bar{A}}} A_1(z)$, $\bar{F}(z) = (z-1)^{n_{\bar{F}}} F_1(z)$, где $A_1(1) \neq 0$, $F_1(1) \neq 0$. В этом случае дискретная система (28), (29) имеет требуемые порядки астатизма, если

$$\bar{\nu} = \max \left\{ \zeta_g^* - n_{\bar{A}}; \zeta_f^* - n_{\bar{F}}; 0 \right\} \quad (33)$$

сумматоров имеются в алгоритме АдЦР. С целью учета условия (33) и согласования полюсов системы с нулями и полюсами УЭМР (28) полиномы $R(z)$ и $L(z)$ выбираются в виде

$$R(z) = B_0(z)(z-1)^{\bar{\nu}} \tilde{R}(z), \quad L(z) = \tilde{A}_{\Omega}(z)\tilde{L}(z), \quad (34)$$

где $\tilde{R}(z)$, $\tilde{L}(z)$ – неопределенные полиномы степеней $\tilde{r} = r - \vartheta - \bar{\nu}$ и $\tilde{l} = r - \mu_{\text{цр}} - n_{\Omega}$.

С учетом равенств (29) и (34) характеристический полином $D(z)$ адаптивной системы управления УЭМР (28) определяется выражением

$$D(z) = \bar{A}_{\Omega}(z)B_0(z)\tilde{D}(z) = \bar{A}(z)B_0(z)(z-1)^{\bar{v}}\tilde{R}(z) + \beta_{\mathfrak{g}}B_0(z)\bar{A}_{\Omega}(z)\tilde{L}(z). \quad (35)$$

Из равенства (35) вытекает расчетное полиномиальное уравнение

$$\tilde{D}(z) = \bar{A}_{\bar{\Omega}}(z)(z-1)^{\bar{v}}\tilde{R}(z) + \beta_{\mathfrak{g}}\tilde{L}(z), \quad (36)$$

минимальное решение которого с учетом условия (31) определяется следующей системой алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} \beta_{\mathfrak{g}} & 0 & 0 & \eta_0 & 0 & \dots \\ 0 & \beta_{\mathfrak{g}} & 0 & \eta_1 & \eta_0 & \dots \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & \eta_1 & \ddots \\ \vdots & 0 & \ddots & \eta_{\bar{n}} & \vdots & \ddots \\ 0 & \vdots & \ddots & 0 & \eta_{\bar{n}} & \ddots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \vdots \\ \lambda_{\tilde{l}} \\ \rho_0 \\ \vdots \\ \rho_{\tilde{r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ \delta_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta_{n_{\tilde{D}}-1} \\ \delta_{n_{\tilde{D}}} \end{bmatrix}. \quad (37)$$

Матрица системы (37) имеет $\tilde{l} + 1$ столбцов, составленных из коэффициента $h_{\mathfrak{g}}$, и $\tilde{r} + 1$ столбцов, составленных из коэффициентов η_{ρ} полинома

$$H(z) = (z-1)^{\bar{v}}\bar{A}_{\bar{\Omega}}(z) = \sum_{\rho=0}^{\bar{n}} \eta_{\rho} z^{\rho}.$$

Согласно уравнению (36) $\deg \tilde{D}(z) = n_{\tilde{D}} = \bar{v} + n_{\bar{\Omega}} + \tilde{r}$, поэтому система (37) включает $N_y = n_{\tilde{D}} + 1$ уравнений и $N_k = \tilde{r} + 1 + \tilde{l} + 1$ неизвестных коэффициентов, т. е.

$$N_y = n_{\tilde{D}} + 1 = n_{\bar{\Omega}} + \bar{v} + \tilde{r} + 1, \quad N_k = \tilde{r} + \tilde{l} + 2 = 2r - \mathfrak{g} - \bar{v} - \mu_{\text{цр}}^* - n_{\Omega} + 2.$$

Так как полиномы $\bar{A}(z)$ и $\bar{B}(z)$ не имеют общих множителей, то система (37) будет иметь единственное решение, если $N_k = N_y$, т. е. если

$$r = n_{\bar{A}} + \bar{v} + \mu_{\text{цр}}^* - 1, \quad \tilde{r} = n_{\bar{A}} + \mu_{\text{цр}}^* - \mathfrak{g} - 1, \quad \bar{n} = n_{\bar{\Omega}} + \bar{v}, \quad (38)$$

$$\tilde{l} = n_{\bar{\Omega}} + \bar{v} - 1, \quad n_{\tilde{D}} = n_{\bar{A}} + n_{\bar{\Omega}} + \mu_{\text{цр}}^* + \bar{v} - \mathfrak{g} - 1.$$

Коэффициенты полинома $\tilde{D}(z)$ степени $n_{\tilde{D}}$ из (36), (37) назначаются с использованием стандартных нормированных передаточных функций (СНПФ) [20, с. 258–260]. С этой целью коэффициенты некоторых СНПФ $V_{yg}(s)$ непрерывных систем хранятся в памяти микропроцессора АдЦР.

Как известно, функции $V(z)$, полученные в результате преобразования $Z_T\{V(s)\}$ (4), обычно имеют относительную степень $\mu_{V,z}$ равную нулю или единице. Поэтому степень знаменателя вспомогательной ПФ $V(s)$ берется равной $n_V = n_{\tilde{D}} - \mu_{\text{доп}}$, где $\mu_{\text{доп}} = \max\{\mu_{\text{оу}} + \mu_{\text{цр}}^* - \mu_{V,z}; 0\}$; $\mu_{\text{оу}} = n_{\bar{A}} - \mathfrak{g} -$

относительный порядок УЭМР (28). Коэффициенты Δ_ρ и величина $t_{p,таб}$ подходящей СНПФ $V(s)$ выбираются из памяти микропроцессора по значениям ζ_g^* , $n_{таб} = n_V$ и $\sigma < \sigma^*$, %. Затем коэффициенты знаменателя этой вспомогательной ПФ $V(s)$ вычисляются по формуле

$$\tilde{\delta}_j = \Delta_j \omega_r^n V^{-j}, \quad j = [n_V, 0], \quad (39)$$

где коэффициент $\omega_r = t_{таб} / (t_{пп}^* - T_y)$. В случае астатизма первого порядка передаточная функция имеет вид $V(s) = \tilde{\delta}_0 / (s^{n_V} + \tilde{\delta}_{\tilde{n}-1} s^{n_V-1} + \dots + \tilde{\delta}_1 s + \tilde{\delta}_0)$; она подвергается Z_T преобразованию (4) при $T = T_y$, что дает функцию $V(z) = \zeta_0(z) / \zeta(z)$. Подчеркнем: преобразование $V(s) \rightarrow V(z)$ (4) удобно выполнять с помощью функции «с2d» пакета MATLAB [22].

Далее находятся полиномы $\tilde{D}(z) = z^{\mu_{доп}} \zeta(z) = \delta_{n_{\tilde{D}}} z^{n_{\tilde{D}}} + \delta_{n_{\tilde{D}}-1} z^{n_{\tilde{D}}-1} \dots + \delta_1 z + \delta_0$ и $H(z) = (z-1)^{\bar{v}} \bar{A}_{\bar{\Omega}}(z) = \eta_{\tilde{n}} z^{\tilde{n}} + \dots + \eta_0$; их коэффициенты δ_j , η_j , а также β_g подставляются в систему (37); ее решение позволяет записать полиномы

$$\tilde{R}(z) = \sum_{j=0}^{\tilde{r}} \rho_j z^j \quad \text{и} \quad \tilde{L}(z) = \sum_{j=0}^{\tilde{l}} \lambda_j z^j. \quad (40)$$

Затем полиномы $R(z)$ и $L(z)$ записываются по формулам (34), а полином $Q(z)$ из уравнения АдЦР (29) определяется по формуле

$$Q(z) = h_g^{-1} \bar{A}_{\bar{\Omega}}(z) \zeta_0(z). \quad (41)$$

Найденные полиномы $\Delta(z)$, $Q(z)$ и $\Lambda(z)$ подставляются в уравнение (29), в результате чего находится уравнение искомого АдЦР для идентифицированного УЭМР. Корректность расчетов проверяется с помощью полиномов

$$D_1(z) = H_0(z) \bar{P}_{\bar{\Omega}}(z) \tilde{D}(z), \quad D_2(z) = \bar{P}(z) \Delta(z) + \bar{H}(z) \Lambda(z). \quad (42)$$

Результаты являются корректными, если коэффициенты при одинаковых степенях z этих полиномов являются близкими друг к другу.

В некоторых случаях при $\zeta_g^* = \zeta_f^* \geq 1$ полином $R(z) = (z-1)^{\bar{v}} R_1(z)$. В этом случае уравнение АдЦР (29) записывается в виде

$$R_1(z) \xi(z) = Q(z) g(z) - L(z) y(z), \quad (z-1)^{\bar{v}} u(z) = \xi(z), \quad (43)$$

где $\xi(z)$ – z -изображение вспомогательной переменной ξ_k . Алгоритм работы микроконтроллера по вычислению значений управляющего воздействия u_k , $k = 0, 1, 2, \dots$, формируется путем перехода в уравнениях (43) к оригиналам u_k , $u_{k-\bar{v}}$, $\xi_{k-\bar{v}}$, $g_{k-\bar{v}}$, $y_{k-\bar{v}}$.

Приведенные выражения (28)–(43) являются соотношениями аналитического алгоритма синтеза АдЦР для каждого канала $g_i \rightarrow y$ УЭМР (1). Для автоматической реализации этого алгоритма параметры необходимых СНПФ должны храниться в памяти микропроцессора АдЦР. Необходимые перекрестные связи между различными каналами УЭМР могут быть обеспечены, как показано в работе [24].

Покажем работоспособность предложенных алгоритмов на численном примере.

5. ПРИМЕР

Пусть в результате изучения некоторого неопределенного УЭМР установлено, что порядок его модели не превышает 4, т. е. $n_{\max} = 4$; он имеет один выход $y(t)$ и два входа: u_1 по управлению $u(t)$ и u_2 по возмущению $f(t)$. Если $\beta_{\max} = 2$, то $N_{\mu} = 2n_{\max} + \beta_{\max} = 10$; если $T_{\text{и}} = 1$ с, то время измерения $t_{\text{и}} = N_{\mu}T_{\text{и}} = 10$ с; допустимые значения пробных управлений $u_{10} = u_{20} = 3$; $\tilde{\Delta}_0 = 0,01$; величина $\xi_T = 10$.

Предлагаемый алгоритм идентификации и синтеза адаптивной системы управления включает следующие пункты.

П. 1. Пробное воздействие $u_1(t) = 3 \cdot 1(t)$ при $u_2(t) = 0$ подается на объект, который находится в установившемся режиме, несколько раз. Отклонения выходной переменной $y(t)$ измеряется с периодом $T_{\text{и}} = 1$ с, полученные значения усредняются. Усредненные значения $y(k) = y_{1k}$ при $u(t) = u_1(t)$ и значения марковских параметров $\tilde{\mu}_1^{\zeta}$, $\zeta = k$, вычисленные по выражению (10), приведены в табл. 1. Там же приведены значения $y_2(k) = y_{2k}$ и $\tilde{\mu}_2^{\zeta}$, найденные при $u_2(t) = 3 \cdot 1(t)$ и $u_1(t) = 0$.

Таблица 1

Table 1

Отчеты выходных переменных и марковские параметры, $T_{\text{и}} = 1$ с

Samples of output variables and Markov parameters, $T_{\text{и}} = 1$ s

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y_{1k}	0	0,2017	0,3784	0,6547	1,0525	1,5988	2,3264	3,2755	4,4951	6,0452	7,9988
y_{2k}	4,2	5,2091	5,8091	6,4091	7,0091	7,6091	8,2091	8,8091	9,4091	10,209	10,609
$\tilde{\mu}_1^k$	0	0,0672	0,0589	0,0921	0,1326	0,1821	0,2425	0,3164	0,4065	0,5167	0,6512
$\tilde{\mu}_2^k$	1,4	0,3364	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000

П. 2. При $\tilde{\mu}_1^v = \tilde{\mu}_1^k$; $\beta = 0$, $v = 1, 2, 3, 4$ вычисляются определители матрицы $\tilde{M}_1^{\beta, v}$ по (21). Это дает $\det \tilde{M}_1^{0,1} = 0,0672$, $\det \tilde{M}_1^{0,2} = 0,0027$,

$\det \tilde{M}_1^{0,3} = -2,8868 \cdot 10^{-5}$, $\det \tilde{M}_1^{0,4} = -8,6722 \cdot 10^{-9} \approx 0$. Отсюда из формул (20) следует, что $\hat{n}_1 = 3$. **П. 3.** При $i=1$, $\hat{n}_1 = 3$, $\beta = 0$ по (22) и (23) вычисляется вектор $\tilde{\eta}_1^3 = [-3,4072 \cdot 10^{-10} \ 1,2214 \ -2,2214]^T$. Так как значение $|\tilde{\eta}_{1,0}^3| = 3,4072 \cdot 10^{-10} \ll \tilde{\Delta}_0 = 0,01$, то условие (5) не выполняется, поэтому ДПО (2) при $T = 1$ с является некорректным, в связи с чем выполняется переход на п. 7. **П. 7.** По формуле $T_n = T_n / \xi_T = 0,1$ с; переход на п. 1. **П. 1.** Так как время однократного измерения реакции УЭМР теперь $t_n = 10T_n = 1$ с, то принимаются $u_{10} = 15$, а $u_{20} = 0,5$. Повтор действий, описанных выше, дает новые округленные значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Отсчеты выходных переменных и марковские параметры $T_n = 0,1$ с**Samples of output variables and Markov parameters, $T_n = 0,1$ s**

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y_{1k}	0	0,5045	0,5918	0,6360	0,6785	0,7241	0,7733	0,8262	0,8830	0,9436	1,0083
y_{2k}	0,7	0,7706	0,7873	0,7981	0,8082	0,8182	0,8282	0,8382	0,8482	0,8582	0,8682
$100 \cdot \tilde{\mu}_1^k$	0	3,3632	0,5821	0,2946	0,2837	0,1821	0,2425	0,3164	0,4065	0,5167	0,6512
$\tilde{\mu}_2^k$	1,4	0,1413	0,0334	0,0215	0,0202	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200

П. 2. Определители матрицы $\tilde{M}_1^{\beta, \nu}$ теперь вычисляются по выражению (21) и данным табл. 2 при $\tilde{\mu}_1^5 = \tilde{\mu}_1^k$; $\beta = 0$, $\nu = 1, 2, 3, 4$. Это дает: $\det \tilde{M}_1^{0,1} = 0,0336$, $\det \tilde{M}_1^{0,2} = 6,5177 \cdot 10^{-5}$, $\det \tilde{M}_1^{0,3} = -8,5611 \cdot 10^{-10}$, $\det \tilde{M}_1^{0,4} = -2,7667 \cdot 10^{-26}$. Отсюда из формул (20) также следует, что $\hat{n}_1 = 3$.

П. 3. Вектор $\tilde{\eta}_1^3 = [-0,113 \ 1,244 \ -2,131]$ вычисляется по выражениям (23) при $i=1$, $\hat{n}_1 = 3$, $\beta = 0$. Значение $|\tilde{\eta}_{1,0}^3| = 0,113 > \tilde{\Delta}_0 = 0,01$, т. е. условие (5) выполняется, и соответствующий ДПО (2) при $T_n = 0,1$ с является корректным; переход на п. 4. **П. 4.** вычисляются по выражению (24) оценки коэффициентов: $\tilde{\gamma}_{1,0}^3 = 0,0324$, $\tilde{\gamma}_{1,1}^3 = -0,0658$, $\tilde{\gamma}_{1,2}^3 = 0,0336$, $\tilde{\gamma}_{1,3}^3 = 0$. Следовательно, по (17) оценка передаточной функции $\tilde{W}_1(z, T_n, \hat{n}_1)$ имеет вид

$$\tilde{W}_1(z; 0,1; 3) = \frac{0,0336z^2 - 0,0658z + 0,0324}{z^3 - 2,131z^2 + 1,244z - 0,113}.$$

П. 5. ПФ $\tilde{W}_1(z, 0, 1; 3)$ подвергается преобразованию Z_T^{-1} , используя функцию «d2c» из MATLAB с расширением «'zoh'» при $T = 0,1$ с. Для наглядности приведем соответствующие команды:

```

bz1 = [0.0336 -0.0658 0.0324];
dz1 = [1 -2.131 1.244 -0.113];
sysd11= tf(bz1,dz1,0.1);
sysc1 = d2c(sysd1,'zoh') Enter

```

По данным MATLAB записывается оценка

$$\hat{W}_1(s) = \frac{0,8s^2 + 0,3s + 0,4}{s^3 + 21,8s^2 - 4,4s + 3,54 \cdot 10^{-10}}. \quad (44)$$

П. 6. Аналогично выполняются шаги 2–5 при $T = 0,1$ с, $i = 2$ и данным табл. 2, что дает оценку

$$\hat{W}_2(s) = \frac{1,4s^2 - 27,03s - 7,8}{s^2 + 22s + 3,908 \cdot 10^{-13}}, \quad (45)$$

переход на п. 8.

П. 8. Оценки характеристического полинома $A(s)$, порядка n и передаточной матрицы $W(s)$ идентифицированного УЭМП определяются по формулам (26) и (27) при очевидных условиях $\hat{\eta}_{1,0}^3 = \hat{\eta}_{2,0}^3 = 0$ в выражениях (44) и (45):

$$\hat{A}(s) = s^3 + 21,8s^2 - 4,4s, \quad \hat{n} = 3, \quad \text{а} \quad \hat{Q}_1(s) = s - 0,2;$$

$$W(s) = \begin{bmatrix} \frac{0,8s^2 + 0,3s + 0,4}{s^3 + 21,8s^2 - 4,4s} & \frac{1,4s^3 - 27,31s^2 - 2,394s + 1,56}{s^3 + 21,8s^2 - 4,4s} \end{bmatrix}. \quad (46)$$

Синтез адаптивного регулятора. Найти разностные уравнения АдЦР (29) с периодом $T_y = 0,6$ с и $\mu_{цр}^* = 1$ для УЭМП (46). Система управления должна иметь $\zeta_g^* = \zeta_f^* = 1$, $\beta^* = 0,32$; длительность переходного процесса не более $t_{пп}^* = 5,6$ с; перерегулирование не более $\sigma^* = 5\%$; переменные y_k и g_k измеряются.

П. 9. Результат идентификации – текущая ПМ (46) объекта подвергается Z_T -преобразованию с помощью функции «c2d» MATLAB при $T_y = 0,6$, что дает

$$W(z) = \begin{bmatrix} \frac{0,05155z^2 - 0,08458z + 0,03998}{z^3 - 2,128z^2 + 1,128z - 2,087 \cdot 10^{-6}} \\ \frac{1,4z^3 - 5,804z^2 + 7,376z - 2,946}{z^3 - 2,128z^2 + 1,128z - 2,087 \cdot 10^{-6}} \end{bmatrix}^T. \quad (47)$$

В (47) малый коэффициент $-2,087 \cdot 10^{-6}$ заменяется нулем, и записываются полиномы уравнения (28):

$$\begin{aligned}\bar{A}(z) &= z^3 - 2,128z^2 + 1,128z, & \bar{B}(z) &= 0,05155(z^2 - 1,6407z + 0,7756), \\ \bar{F}(z) &= 1,4z^3 - 5,804z^2 + 7,376z - 2,946.\end{aligned}\quad (48)$$

П. 10. В данном случае $|z_{1,2}^{\bar{B}}| = 0,6016$, $z_1^{\bar{A}} = 0$, $z_2^{\bar{A}} = 1,128$, $z_3^{\bar{A}} = 1,0$, $\bar{F}(1) \neq 0$, т. е. $n_{\bar{A}} = 3$, $n_{\Omega} = 1$, $n_{\bar{\Omega}} = 2$, $n_{\bar{F}} = 0$; $\vartheta = 2$, $\beta_{\vartheta} = 0,05155$, $\mu_{\text{оу}} = 3 - 2 = 1$; корни $z_i^{\bar{B}}$ условию (32) удовлетворяют; полином $\bar{A}(z)$ факторизуется, что дает $\bar{A}_{\Omega}(z) = z$, $\bar{A}_{\bar{\Omega}}(z) = z^2 - 2,128z + 1,128$, $n_{\bar{\Omega}} = 2$; $\bar{\nu} = \max\{1-1; 1-0; 0\} = 1$. Вычисления по формулам (38) и последующим дают: $r = 3 + 1 + 1 - 1 = 4$, $\tilde{r} = 3 + 1 - 2 - 1 = 1$, $\check{n} = 2 + 1 = 3$, $\tilde{l} = 2 + 1 - 1 = 2$, $n_{\bar{D}} = 3 + 2 + 1 + 1 - 2 - 1 = 4$. Пусть $\mu_{V,z} = 1$, тогда $\mu_{\text{доп}} = 1 + 1 - 1 = 1$, $n_V = 4 - 1 = 3$.

П. 11. Коэффициенты Δ_j и величина $t_{p,\text{таб}}$ выбираются из памяти микропроцессора по значениям $\zeta_g^* = 1$, $n_{\text{таб}} = n_V = 3$ и $\sigma \% = 0 \% < 5 \%$: $\Delta_0 = 1$, $\Delta_1 = 3$, $\Delta_2 = 3$, $\Delta_3 = 1$, $t_{p,\text{таб}} = 6,31$ с. Коэффициент $\omega_r = 6,31 / (5,6 - 0,6) \approx 1,262$, а коэффициенты $\tilde{\delta}_j$ вычисляются по (39): $\tilde{\delta}_3 = 1$, $\tilde{\delta}_2 = 3 \cdot 1,292 = 3,786$, $\tilde{\delta}_1 = 3 \cdot 1,292^2 = 4,7779$; $\tilde{\delta}_0 = 1 \cdot 1,292^3 = 2,0099$. Составленная по этим коэффициентам вспомогательная ПФ $V(s) = 2,0099 / (s^3 + 3,786s^2 + 4,7779s + 2,0099)$ подвергается Z_T преобразованию (4) при $T_y = 0,6$ с, что дает полиномы $\zeta_0(z) = 0,04147z^2 + 0,09497z + 0,01331$ и $\zeta(z) = z^3 - 1,40695z^2 + 0,6598z - 0,1031$. Коэффициенты знаменателя округлены по условию астатизма первого порядка [20, с. 151], причем $|z_j^{\zeta}| \leq 0,4861$, $j = \overline{1,3}$, т. е. $\zeta(z) = \zeta_{\Omega}(z)$ и $\tilde{D}(z) = z\zeta(z) = z^4 - 1,40695z^3 + 0,6598z^2 - 0,1031z$. В данном случае полином $H(z) = z^3 - 3,128z^2 + 3,256z - 1,128$ и $\beta_{\vartheta} = 0,05155$, $\tilde{l} = 2$, $\tilde{r} = 1$. Решение системы (37), составленной по полученным данным, позволяет с учетом (34), (40) и (41) записать полиномы: $\tilde{L}(z) = 54,0688z^2 - 88,8233z + 37,6594$; $\tilde{R}(z) = z + 1,7211$;

$$R(z) = (z-1)(z^3 + 0,0804z^2 - 2,0482z + 1,3349),$$

$$L(z) = 54,0688z^3 - 88,8233z^2 + 37,6594z, \quad (49)$$

$$Q(z) = 0,8045z^3 + 1,8423z^2 + 0,2582z.$$

Найденные полиномы $R(z)$, $Q(z)$ и $L(z)$ подставляются в (29), что дает уравнение искомого АдЦР. Корректность расчетов проверяется с помощью полиномов:

$$D_1(z) = z^7 - 3,0476z^6 + 3,7438z^5 - 2,2769z^4 + 0,6809z^3 - 0,08z^2;$$

$$D_2(z) = z^7 - 3,0476z^6 + 3,7436z^5 - 2,2765z^4 + 0,6805z^3 - 0,0796z^2 - 0,0001z.$$

Результаты являются корректными, так как коэффициенты при одинаковых степенях z этих полиномов являются близкими друг к другу.

П. 12. Уравнение АдЦР записывается по (29) с учетом $\bar{v} = 1$ и (49):

$$(z-1)u(z) = \xi(z), (z^3 - 0,0804z^2 - 2,0482z + 1,3349)\xi(z) = (0,8045z^3 + 1,8423z^2 + 0,2582z)g(z) - (54,0688z^3 - 88,8233z^2 + 37,6594z)y(z). \quad (50)$$

П. 13. Алгоритм работы микроконтроллера по вычислению значений управляющего воздействия u_k для УЭМР (46) формируется путем перехода в уравнениях (50) к оригиналам:

$$\xi_{k-1} = 0,0804\xi_{k-2} + 2,0482\xi_{k-3} - 1,3349\xi_{k-4} + 0,8045g_{k-1} + 1,8423g_{k-2} + 0,2582g_{k-3} - 54,0688y_{k-1} + 88,8233y_{k-2} - 37,6594y_{k-3};$$

$$u_k = u_{k-1} + \xi_{k-1}; \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Для краткости здесь приведены округленные значения коэффициентов. С целью получения корректных уравнений АдЦР необходимо при вычислениях учитывать не менее 13–15 значащих цифр после запятой.

На рисунке приведена переходная функция синтезированной дискретной системы управления (47) и (50). Как видно из выражения (50) и рисунка, относительный порядок АдЦР, порядки астатизма, перерегулирование и длительность переходного процесса синтезированной системы соответствуют заданным значениям.

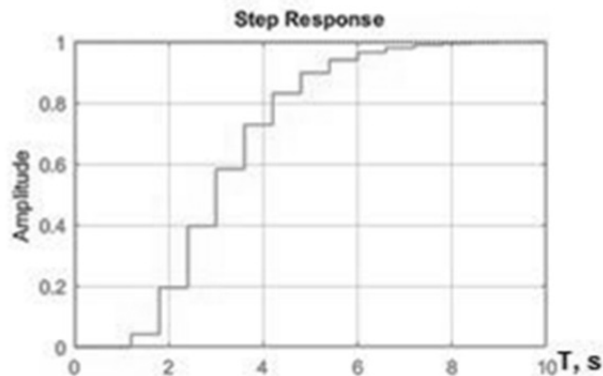


График переходной функции синтезированной системы

Synthesis system transition function graph

Приведенные выражения (28)–(43) позволяют по идентифицированным моделям аналитически синтезировать алгоритм АдЦР для каждого канала $g_i \rightarrow y_i$ УЭМР (1), если необходимые СНПФ хранятся в памяти микропроцессора АдЦР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данной работе метод позволяет создавать адаптивные системы управления полными многомерными неопределенными элементами микророботов и другими объектами. Приведенные в статье расчетные соотношения охватывают как процедуру идентификации текущих значений порядка и параметров моделей, так и процедуру синтеза цифровых регуляторов по этим моделям. При этом разрешимость задачи идентификации обеспечивается автоматическим выбором периода дискретизации выходных переменных. Получаемые цифровые регуляторы имеют минимальную сложность за счет согласования полюсов системы с достаточно левыми нулями и полюсами микророботов и обеспечивают заданные порядки астатизма к задающим воздействиям и внешним возмущениям. Алгоритм расчета цифровых регуляторов является полностью аналитическим, и после настройки под конкретный микроробот реализуется автоматически. При этом используются минимальная информация о микророботах, а также стандартные нормированные передаточные функции, которые хранятся в памяти микроконтроллера.

Предложенный подход может применяться для создания адаптивных систем управления не только неопределенными исполнительными системами микророботов, но и неопределенными объектами промышленного, сельскохозяйственного и специальных производств, а также для решения различных задач управления в социальной сфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.В., Юревич Е.И. Мини- и микроробототехника: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 96 с.
2. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В. Модели современных систем автоматического управления: учебное пособие. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. – 66 с.
3. Acar C., Shkel A. MEMS vibratory gyroscopes: structural approaches to improve robustness. – New York: Springer Science & Business Media, 2008. – 260 p.
4. A neuromuscular interface for robotic devices control / I. Kastalskiy, V. Mironov, S. Lobov, N. Krilova, A. Pimashkin, V. Kazantsev // Computational and Mathematical Methods in Medicine. – 2018. – Art. 8948145. – P. 1–8. – doi: 10.1155/2018/8948145.
5. Concurrent learning adaptive control of linear systems with exponentially convergent bounds / G. Chowdhary, T. Yucelen, M. Muhlegg, E. Johnson // International Journal on Adaptive Control and Signal Processing. – 2013. – Vol. 27, N 4. – P. 280–301.
6. Круглов С.П. Адаптивное управление неминимально-фазовым скалярным объектом второго порядка с обеспечением заданных характеристик переходного процесса // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 4. – С. 33–53.
7. Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А. Адаптивные системы управления: учебное пособие / Южный федеральный университет. – Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. – 120 с.
8. Zhu Y., Hou Z. Controller Dynamic Linearisation-based model-free adaptive control framework for a class of non-linear system // IET Control Theory and Applications. – 2015. – Vol. 9, iss. 7. – P. 1162–1172.

9. Красовский А.А., Наумов А.И. Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 1. – С. 69–75.
10. Айда-заде К.Р., Рагимов А.Б. Идентификация кусочно-постоянных параметров процесса фильтрации и границ областей их постоянства // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 8. – С. 60–75.
11. Identification, estimation and control for linear systems using measurements of higher order derivatives / Z. Shao, C. Zheng, D. Efimov, W. Perruquetti // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2017. – Vol. 139 (12). – P. 1–6.
12. Jayawardhana R.N., Ghosh B.K. Kalman filter based iterative learning control for discrete time MIMO systems // Proceedings of 30th Chinese Control and Decision Conference. – Shenyang, China, 2018. – P. 2257–2264.
13. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – М.: Мир, 1971. – 237 с.
14. Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Двухэтапный устойчивый алгоритм непараметрической идентификации системы с высоким уровнем шума входного сигнала // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 21–40. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-21-40.
15. Воевода А.А., Бобобеков К.М. Активная идентификация параметров модели перевернутого маятника по углу при подаче на вход синусоидальных сигналов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 21–37.
16. Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А. Анализ и синтез систем управления с применением системных инвариантов. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016. – 128 с.
17. Марковские параметры многомерных динамических систем управления / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, В.Н. Рябченко // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 45–51.
18. Chen C.T. Linear systems theory and design. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.
19. Гайдук А.Р. Синтез систем автоматического управления по передаточным функциям // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 1. – С. 11–16.
20. Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А. Анализ и аналитический синтез цифровых систем управления: монография. – СПб.: Лань, 2018. – 199 с. – ISBN 978-5-8114-2813-7.
21. Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Шаповалов И.О. Дискретное адаптивное управление движением группы мобильных роботов в неорганизованной среде // Системный анализ, управление и обработка информации: труды IX Международной научной конференции (Дивноморское, 20–26 сентября 2018 г.). – Ростов н/Д., 2018. – С. 56–67.
22. Дьяконов В.П. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Солон-пресс, 2008. – 800 с.
23. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1989. – 549 с.
24. Гайдук А.Р., Колоколова К.В. Синтез систем автоматического управления неустойчивыми многомерными объектами // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 1 (66). – С. 26–40.

Гайдук Анатолий Романович, доктор технических наук, профессор Южного федерального университета, действительный член Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова, член ИБЕЕ. Основное направление научных исследований – теория систем автоматического управления, анализ и синтез, робототехника. Имеет более 350 научных публикаций, в том числе 19 монографий. E-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Капустян Сергей Григорьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Южного научного центра РАН. Основное направление научных исследований – групповая робототехника, многопроцессорные информационно-управляющие и вычислительные системы. Имеет более 280 научных публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: kap56@mail.ru

Gaiduk Anatoly Romanovich, D.Sc. (Eng.), professor at the Southern Federal University; head of the department in the Kislovodsk Humanities Technical Institute; full member of the Academy of Engineering Sciences named after A.M. Prokhorov. The main field of his scientific research is the theory of automatic control systems and robotic systems, analysis and synthesis. He has over 330 scientific publications including 19 monographs. E-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Kapustyayn Sergey Grigorievich, PhD (Eng.), a leading research fellow in the UNSC RAS; head of the Research Institute of the MVS named after Academician A.V. Kalyaev in SFU. The main field of his scientific research is group robotics, multiprocessor information management and computer systems. He has over 280 scientific publications including 5 monographs. E-mail: kap56@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-33-56

Analytical design of micro-robot executive systems under uncertainty*

A.R. GAIDUK¹, S.G. KAPUSTYAN²

¹ *Southern Federal University, 44 Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347922; Russian Federation*

² *Federal Research Centre the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Street, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation*

^a *gaiduk_2003@mail.ru* ^b *kap56@mail.ru*

Abstract

Recently parallel structure mechanisms have been more and more often used instead of console type manipulators. These mechanisms allow achieving higher speeds, accelerations and accuracy of movements of work tools caused by such technological operations as laying-out and laser cutting of sheet materials, assembly, welding and many others. In this connection the problem of developing corresponding design methods of control becomes quite relevant. The known design methods results in rather complex control systems both from the point of view of their design and their realization. One of the challenges is taking into account the working area limitation of parallel structure mechanisms, especially when designing control optimal in terms of the square-law criteria. The design method of multi-agent control for parallel structure mechanisms is suggested on the example of tripod control. Control laws and algorithms are generated on the basis of a decoupled approach and a method of analytical system design with control by output and impacts (ASDCOI). Application of this analytical method allows creating multi-agent control systems for parallel structure mechanisms with the necessary quality parameters in transient and steady state modes.

In the given paper the known mathematical tripod model is used. It is shown that desirable trajectories of work tool movements should be formed based on the developed manipulator tasks. The computer simulation results confirm the efficiency of the suggested approach. The developed approach can be applied to create multi-agent manipulators with parallel structure mechanisms for solving a wide scope of problems such as application of fertilizers, environmental observations, improving quality of the system machine vision, and carrying out many industrial and technological operations.

Keywords: Console manipulator, parallel structure mechanism, tripod, movement trajectory, control, system, design, decoupled approach, control by output and impacts

* *Received 15 February 2019.*

The study was carried out with the financial support of the Russian Federal Property Fund in the framework of scientific projects No. 18 58 00051, No. 17 29 07054, No. 16-29-04194 and No. 18-07-00637, as well as in the framework of the implementation of the Basic Research Program of the Russian Academy of Sciences in priority areas determined by the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 7 "New developments in promising areas of energy, mechanics and robotics", No. gr. Project AAAA-A18-118020190041-1).

REFERENCES

1. Ivanov A.V., Yurevich E.I. *Mini- i mikrorobototekhnika* [Mini and microrobotics]. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2011. 96 p.
2. Eremin E.L., Telichenko D.A., Chepak L.V. *Modeli sovremennykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Models of modern automatic control systems]. Blagoveshchensk, AmSU Publ., 2014. 66 p.
3. Acar C., Shkel A. *MEMS vibratory gyroscopes: structural approaches to improve robustness*. New York, Springer Science & Business Media, 2008. 260 p.
4. Kastal'skiy I., Mironov V., Lobov S., Krilova N., Pimashkin A., Kazantsev V. A neuromuscular interface for robotic devices control. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2018, art. 8948145, pp. 1–8. doi: 10.1155/2018/8948145.
5. Chowdhary G., Yucelen T., Muhlegg M., Johnson E. Concurrent learning adaptive control of linear systems with exponentially convergent bounds. *International Journal on Adaptive Control and Signal Processing*, 2013, vol. 27, no. 4, pp. 280–301.
6. Kruglov S.P. Adaptivnoe upravlenie neminimal'no-fazovym skalyarnym ob"ektom vtorogo poryadka s obespecheniem zadannykh kharakteristik perekhodnogo protsesssa [Adaptive control of a non-minimal-phase scalar object of the second order with the maintenance of the preset transient characteristics]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4, pp. 33–53.
7. Gaiduk A.R., Plaksienko E.A. *Adaptivnye sistemy upravleniya* [Adaptive management systems: a tutorial]. Rostov-on-Don, Taganrog, YuFU Publ., 2018. 120 p.
8. Zhu Y., Hou Z. Controller Dynamic Linearisation-based model-free adaptive control framework for a class of non-linear system. *IET Control Theory and Applications*, 2015, vol. 9, iss. 7, pp. 1162–172.
9. Krasovskii A.A., Naumov A.I. Analiticheskaya teoriya samoorganizuyushchikhsya sistem upravleniya s vysokim urovnem iskusstvennogo intellekta [Analytical theory of self-organizing control systems with a high level of artificial intelligence]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya – Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2001, no. 1, pp. 69–75. (In Russian).
10. Aida-zade K.R., Rahimov A.B. Identifikatsiya kusochno-postoyannykh parametrov protsesssa fil'tratsii i granits oblastei ikh postoyanstva [Identification of piecewise constant filtration parameters and boundaries of their constancy domains]. *Automation Remote Control*, 2017, vol. 78, iss. 8, pp. 1404–1416. Translated from *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 8, pp. 60–75.
11. Shao Z., Zheng C., Efimov D., Perruquetti W. Identification, estimation and control for linear systems using measurements of higher order derivatives. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2017, vol. 139 (12), pp. 1–6.
12. Jayawardhana R.N., Ghosh B.K. Kalman filter based iterative learning control for discrete time MIMO systems. *Proceedings of 30th Chinese Control and Decision Conference*, Shenyang, China, 2018, pp. 2257–2264.
13. Kalman R., Falb P., Arbib M. *Topics in mathematical system theory*. New York, McGraw-Hill, 1969 (Russ. ed.: Kalman R., Falb P., Arbib M. *Ocherki po matematicheskoi teorii sistem*. Moscow, Mir Publ., 1971. 237 p.).
14. Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. Dvukhetapnyi ustoichivyi algoritm neparametricheskoi identifikatsii sistemy s vysokim urovnem shuma vkhodnogo signala [Two-step robust algorithm of nonparametric identification for a system with a high-noise input signal]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 21–40. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-21-40.
15. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Aktivnaya identifikatsiya parametrov modeli perevernutogo mayannika po uglu pri podache na vkhod sinusoidal'nykh signalov [Active identification of the inverted pendulum model data on angle in applied to the input sinusoidal signal]. *Sbornik nauchnykh*

trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university, 2016, no. 2 (84), pp. 21–37.

16. Gaiduk A.R., Plaksienko E.A. *Analiz i sintez sistem upravleniya s primeneniem sistemnykh invariantov* [Analyses and synthesis of control systems with application of system invariant in MATLAB]. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, 2016. 128 p.

17. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Ryabchenko V.N. Markovskie parametry mnogomernykh dinamicheskikh sistem upravleniya [Markov parameters of multivariable dynamic control systems]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2013, iss. 1, pp. 45–51.

18. Chen C.T. *Linear systems theory and design*. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.

19. Gaiduk A.R. Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya po peredatochnym funktsiyam [Synthesis of control systems on transfer functions]. *Automation and Remote Control*, 1980, vol. 41, iss. 1, pp. 6–11. Translated from *Avtomatika i telemekhanika*, 1980, no. 1, pp. 11–16.

20. Gaiduk A.R., Plaksienko E.A. *Analiz i analiticheskii sintez tsifrovyykh sistem upravleniya* [Analysis and analytical design of digital control systems]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2018. 199 p. ISBN 978-5-8114-2813-7.

21. Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Shapovalov I.O. [Discrete adaptive control of a group of mobile robots motion in an unorganized environment]. *Sistemnyi analiz, upravlenie i obrabotka informatsii: trudy IX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [System analysis, control and information processing: Proceedings of the IX International Scientific Conference], Divnomorskoe, September 20–26, 2018. Rostov-on-Don, 2018, pp. 56–67. (In Russian).

22. D'yakonov V.P. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. *Osnovy primeneniya* [MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Application basics]. 2nd ed. Moscow, Solon-press Publ., 2008. 800 p.

23. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 549 p.

24. Gaiduk A.R., Kolokolova K.V. Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya neustoychivymi mnogomernymi ob"ektami [Synthesis of control systems by unstable multivariable plants]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (66), pp. 26–40.

Для цитирования:

Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Аналитический синтез исполнительных систем микrorоботов в условиях неопределенности // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 33–56. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-33-56.

For citation:

Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. Analiticheskii sintez ispolnitel'nykh sistem mikrorobotov v usloviyakh neopredelennosti [Analytical design of micro-robot executive systems under uncertainty]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 33–56. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-33-56.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 51.74+621.165

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-57-76

Повышение точности идентификации параметров математических моделей существующего теплоэнергетического оборудования*

А.М. КЛЕР^а, В.Э. АЛЕКСЕЮК^б

664033, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

^а kler@isem.irk.ru ^б alexeyuk.vitaliy@yandex.ru

Известно, что фактическое состояние теплоэнергетического оборудования тепловых электрических станций меняется в ходе эксплуатации. Таким образом, при оперативном управлении режимами работы станции важной является задача оценивания состояния основного теплоэнергетического оборудования. Современные теплоэнергетические установки, такие как котельные агрегаты и паровые турбины, представляют собой технические системы, обладающие весьма сложными технологическими схемами, разнообразными элементом составом и режимами функционирования. Ввиду этого основными инструментами исследования теплоэнергетического оборудования являются методы математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации. Задачи оценивания состояния режимов работы теплоэнергетических систем и идентификации параметров математических моделей теплоэнергетического оборудования практически не нашли приемлемого решения из-за сложности объектов исследования и их математических моделей, а также в связи с отсутствием эффективных методов, алгоритмов и компьютерных программ решения необходимых математических задач. Результаты решения вышеперечисленных задач имеют важное самостоятельное значение и играют важную роль для качественного решения проблем управления теплоэнергетическими установками, например, для оптимального распределения нагрузок между агрегатами тепловых электрических станций и оптимального управления режимами работы теплоэнергетического оборудования. В данной работе приводится описание усовершенствованной методики идентификации (настройки) параметров математических моделей существующего теплоэнергетического оборудования. Данная методика позволяет более эффективно выявлять грубые погрешности измерений контрольных параметров, используемых для идентификации математической модели исследуемого оборудования, оценивать корректность и исправлять ошибки построения самой математической модели и повысить точность идентификации. Кроме прочего, в статье обсуждается вопрос оценки точности идентификации параметров математических моделей теплоэнергетического оборудования, зависящей от точности измерений контрольных парамет-

* Статья получена 30 января 2019 г.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания 17.4.4 (регистрационный № АААА-А17-117030310449-7) фундаментальных исследований СО РАН.

ров, используемых для настройки модели, а также от корректности построения самой математической модели и используемой расчетной методики.

Ключевые слова: идентификация параметров, математическое моделирование, критерии точности, измеряемые контрольные параметры, настройка модели, оперативное управление, относительные невязки, режим работы, оценивание состояния, угольный энергоблок

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть электроэнергии производится и будет производиться в обозримом будущем путем преобразования в нее теплоты сгорания органического топлива. Из всех видов органического топлива уголь остается в мире основным энергоносителем для производства тепловой и электрической энергии, так как его мировые запасы преобладают над запасами других энергоресурсов. Таким образом, следует, что задачи повышения энергетической и экономической эффективности эксплуатации основного оборудования тепловых электрических станций (ТЭС), работающих на сжигаемом топливе, являются одними из самых актуальных и заслуживающих внимания.

Важно отметить, что эффективность работы теплоэнергетических установок (ТЭУ) напрямую зависит от режимов эксплуатации и оперативного управления оборудованием. В свою очередь, для повышения эффективности управления основным оборудованием электростанции оперативному персоналу нужно иметь «обратную связь», другими словами – отслеживать, как изменяются параметры оборудования и его показатели, которые трудно или невозможно измерить (расход сжигаемого топлива, КПД энергоблока, удельный расход топлива и др.) при изменении управляющих воздействий.

Кроме того, фактическое состояние теплоэнергетического оборудования меняется в ходе эксплуатации. Так, может происходить занос солями проточной части турбины, загрязнение теплообменных поверхностей котла, регенеративных подогревателей и другие изменения, оказывающие влияние на режим работы оборудования и его эффективность. Таким образом, при оперативном управлении режимами работы ТЭУ важными являются задачи оценивания состояния основного теплоэнергетического оборудования ТЭС и идентификация (настройка, корректировка) математических моделей элементов ТЭУ.

Важно отметить, что проблемы идентификации параметров, оценивание состояния и оптимизации режимов работы сложных теплоэнергетических систем, таких как современные угольные энергоблоки, газотурбинные и парогазовые установки и другие агрегаты ТЭС, практически не нашли приемлемого решения из-за сложности объектов исследования и их математических моделей, а также в связи с отсутствием эффективных методов, алгоритмов и компьютерных программ решения необходимых математических задач. Результаты решения вышеперечисленных задач имеют важное самостоятельное значение и играют существенную роль для качественного решения проблем управления ТЭУ, например, для более эффективного распределения нагрузок между агрегатами ТЭС и оптимального управления режимами работы ТЭУ.

Современные теплоэнергетические установки, такие как угольные энергоблоки и входящие в их состав котельные агрегаты, паровые турбины и другое вспомогательное оборудование, представляют собой технические системы, обладающие весьма сложными технологическими схемами, разнообраз-

ными элементным составом и режимами функционирования. Ввиду этого основными инструментами исследования теплоэнергетического оборудования ТЭС являются методы математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации.

Труды Г.В. Ноздренко и Ю.В. Овчинниковой [1, 2], а также Г.Д. Крохина и М.Я. Супруненко [3], выполненные в НГТУ, являются первыми, где поднималась проблема идентификации и оценивания состояния математических моделей теплоэнергетического оборудования. Авторами предлагалась оригинальная методика согласования уравнений теплового и энергетического балансов. Однако стоит отметить, что данный подход не решил всех проблем диагностики оборудования. В частности, в постановке задачи оценивания состояния отсутствовали постоянные коэффициенты, определяющие фактическое состояние оборудования и не поддающиеся прямому измерению. Более того, не была учтена взаимосвязь между погрешностью приборов, использованных для получения контрольных замеров, и погрешностью измерений параметров.

В области электроэнергетического оборудования вопросы оценивания состояния и идентификации с учетом погрешности измерений изучались в ИСЭМ СО РАН А.З. Гаммом и его коллегами, начиная с 70-х годов прошлого столетия [4–6]. Задачи оценивания состояния и идентификации в системах диспетчерского управления ЭЭС решаются на основе идеологии контрольных уравнений. В работе авторов [5] описывается подход, позволяющий выявлять так называемые «плохие» замеры контрольных параметров. Однако, подход в целом носит эвристический характер, и успех анализа корректности измерений зачастую зависит от правильного распределения исходной системы уравнений на базисную и небазисную, а также от того, каким способом была сформирована линейная комбинация контрольных уравнений и выбраны переменные, исключаемые из состава контрольных уравнений.

Оценивание состояния и идентификация параметров математических моделей выполняются и при исследовании трубопроводных систем. Одним из примеров решения таких задач являются работы Н.Н. Новицкого и его коллег [7–9]. В данной работе автор представил комплексный подход к решению широкого круга задач и методов оценивания состояния гидравлических и трубопроводных систем. Следует отметить, что в работе значительное внимание было уделено вопросам детектирования ошибочной информации в измерениях [9].

В отделе теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева накоплен богатый опыт исследования сложных теплоэнергетических установок и тепловых электрических станций. Среди ранних работ выделяются труды А.М. Клера и Н.П. Декановой [10, 11], в которых рассматриваются подходы к оптимизации математических моделей ТЭУ при оперативном управлении режимами ТЭЦ. В работе А.В. Михеева предлагается согласованная методика диагностики исследуемого оборудования, основанная на совместном решении экстремальных оптимизационных задач оценивания состояния и идентификации характеристик ТЭУ [12]. Более того, в работе [13] предложен подход к повышению качества исходной информации за счет исключения погрешностей в измеренных параметрах. Исследования А.М. Клера, А.С. Максимова и Е.Л. Степановой [14–17] являются одними из последних работ, посвященных данной тематике. В них рассматривается разработка «высокоскоростных» математических моделей основного оборудования ТЭС, позво-

ляющих выполнять сложные оптимизационные расчеты режимов работы агрегатов ТЭЦ, а также описывается методика настройки математических моделей под реальное состояние исследуемого оборудования. Данная методика позволяет настроить коэффициенты математической модели таким образом, чтобы результаты, получаемые с помощью математической модели, как можно более точно соответствовали фактическому состоянию оборудования, что обеспечивает обоснованность оптимизационных решений.

Среди современных зарубежных работ можно отметить исследование, выполненное в Испании [18]. В данной работе приводится подход, заключающийся в мультимодальной оптимизации (вычисления в различных режимах работы оборудования) как основа для калибровки математической модели. Методика основана на генетическом алгоритме и посвящена настройке динамических нелинейных систем, таких как модели биологического роста и модели эффективного управления для увеличения прибыли. В работе [19] исследуется проблема обнаружения и диагностики неисправностей промышленного оборудования на примере электростанции. Работа [20], выполненная в одном из университетов Пекина, описывает методику оперативного контроля за производительностью паровой турбины, основанную на более точном измерении потоков теплоносителей и разработанном методе согласования полученных данных.

Исследование вышеизложенных методик выявило присущие им недостатки, оказывающие негативное влияние на точность и корректность идентификации параметров математических моделей существующего оборудования на его фактическое состояние. Во-первых, задача идентификации решается успешно, когда среди замеренных параметров отсутствуют грубые ошибки измерения. Но если среди замеров присутствуют «плохие» с грубыми ошибками измерения в каком-либо из рассматриваемых режимов работы, то такие ошибки перераспределяются между различными замеряемыми параметрами в одном режиме работы и, что важнее, между различными режимами. Такое перераспределение не позволяет однозначно определить ошибочный замер и приводит к неверным решениям. Во-вторых, вышеизложенные методики не учитывают погрешности непосредственно самой математической модели исследуемого оборудования. С другой стороны, математические модели основного теплоэнергетического оборудования ТЭС основаны на нормативных методах расчета и не всегда описывают реальные процессы с достаточной точностью. Это вносит дополнительные погрешности, которые должны быть учтены при решении задачи идентификации.

Более того, в большинстве вышеизложенных методик и подходов других авторов не исследуется вопрос оценки точности выполненной идентификации математических моделей ТЭУ. В связи с этим возникает необходимость разработки критериев точности методики идентификации и выполняемых с ее помощью расчетов по настройке математических моделей исследуемого оборудования на фактическое его состояние по результатам опытных испытаний и замеров.

В настоящей работе предлагается разработать новую усовершенствованную методику идентификации параметров математических моделей ТЭУ. Суть идеи заключается в следующем: разбить данную сложную оптимизационную задачу на две более простые задачи с разными целевыми функциями,

решаемые поэтапно, что позволит преодолеть вышеизложенные проблемы и повысить точность настройки математических моделей исследуемого оборудования ТЭС с учетом его фактического состояния.

1. ПЕРВЫЙ ЭТАП УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЭУ

Состав параметров математической модели задачи идентификации можно условно разделить следующим образом: параметры, измеряемые на исследуемой установке и являющиеся информационно-входными (задаваемыми) для математической модели (x_3); измеряемые параметры, являющиеся информационно-выходными (вычисляемыми) для математической модели (y_3), и параметры, которые не измеряются на реальной установке, но являются информационно-входными (задаваемыми) для модели (x_H). Состав массива настраиваемых коэффициентов (θ) математической модели подбирается индивидуально для каждой модели. Они необходимы для влияния на физические процессы, происходящие в элементах математической модели. Обычно используются такие параметры, как коэффициенты тепловой эффективности поверхностей теплообмена котла, гидравлические сопротивления теплообменников, внутренние относительные коэффициенты отсеков турбины и другие.

На первом этапе решения задачи идентификации параметров математической модели предлагается выявлять и исключать из дальнейшего расчета неточные замеры контрольных параметров. Неточными являются значения тех измеренных параметров, которые находятся за пределами заявленной точности средств измерений, использованных во время испытаний. Для выявления таких замеров предлагается решать задачу минимизации вспомогательного коэффициента ψ , который соответствует значению максимального относительного отклонения (невязки) среди всех измеряемых контрольных параметров. Относительная невязка измеряемых контрольных параметров – это разница между рассчитанным на построенной математической модели значением контрольного параметра и значением, измеренным на реальном оборудовании при его испытании, отнесенная к дисперсии погрешности датчика, используемого для получения данного замера. Математическая постановка первого этапа идентификации имеет следующий вид:

$$\min_{x_H^i, x_3^i, \theta, \psi} \psi \quad (1)$$

при условиях:

$$H(y^i, x_H^i, x_3^i, \theta) = 0; \quad (2)$$

$$G(y^i, x_H^i, x_3^i, \theta) \geq 0; \quad (3)$$

$$x_{3j}^i - \psi \sigma_{xj} \leq \overline{x_{3j}^i} \leq x_{3j}^i + \psi \sigma_{xj}; \quad (4)$$

$$y_{3k}^i - \psi \sigma_{yk} \leq \overline{y_{3k}^i} \leq y_{3k}^i + \psi \sigma_{yk}; \quad (5)$$

$$\sigma = (S\alpha)/3, \quad (6)$$

где H – функция ограничений равенств, включающая в себя все уравнения математической модели и входящих в ее состав элементов (уравнения теплопередачи, теплового баланса, уравнения расчета гидравлических сопротивлений и др.); G – функция ограничений неравенств, учитывающая физические и режимные ограничения на работу реального оборудования; ψ – коэффициент, равный модулю максимального относительного отклонения параметров (с верхней чертой – параметры, рассчитываемые с помощью математической модели; без черты – параметры, полученные при измерении на реальном оборудовании); σ_x, σ_y – дисперсия погрешности замера соответственно вектора x_3 и вектора y_3 ; S – верхний предел измерения датчика (шкала датчика); α – класс точности датчика; i – индекс, указывающий на порядковый номер режима работы оборудования.

Для определения ошибочных замеров необходимо найти активные ограничения на отклонение значения замеряемого на установке параметра от вычисляемого в результате расчета математической модели ТЭУ. Значение замера, входящего в это ограничение, может быть помечено как ошибочное и быть исключенным из дальнейшего рассмотрения. Расчеты показали, что такой подход позволяет более эффективно находить ошибки измерения и минимизирует перераспределение ошибочных измерений между параметрами в различных режимах.

Кроме того, исследования показали, что решения оптимизационной задачи на первом этапе идентификации (1) позволяют проверить построенную математическую модель ТЭУ на предмет ошибок моделирования и указывает на «узкие» места в расчетной схеме модели. Если в результате решения данной оптимизационной задачи имеются параметры, отклонение которых от замеров в разных режимах работы оборудования значительно отличается, то это говорит об отсутствии необходимого коэффициента в списке настраиваемых или свидетельствует о неточности построения самой математической модели. Кроме того, незначительные потоки теплоносителей, которыми пренебрегли во время построения математической модели исследуемого оборудования, могут внести дополнительную погрешность при идентификации. Поэтому на данном этапе расчетов есть возможность внести необходимые изменения в структуру модели, описывая особенности исследуемого теплоэнергетического оборудования.

Результатом решения оптимизационной задачи на первом этапе усовершенствованной методики идентификации параметров математических моделей ТЭУ является значение минимизируемой максимальной относительной невязки замеряемых контрольных параметров во всех рассматриваемых режимах работы оборудования. Также составляется список тех замеряемых контрольных параметров, значения которых выходят за рамки заявленной точности датчиков. Такие замеры помечаются как ошибочные и исключаются из оптимизационной задачи, решаемой на следующем этапе идентификации.

2. ВТОРОЙ ЭТАП УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЭУ

На втором этапе усовершенствованной методики идентификации параметров математической модели решается оптимизационная задача, которая имеет следующий вид:

$$\min_{X_H^i, X_3^i, \theta} \sum_{i=1}^R \left[\sum_{j=1}^N \frac{(x_{3j}^i - \overline{x_{3j}^i})^2}{\sigma_{xj}^2} + \sum_{k=1}^M \frac{(y_{3k}^i - \overline{y_{3k}^i})^2}{\sigma_{yk}^2} \right] \quad (7)$$

при условиях:

$$H(y^i, x_H^i, x_3^i, \theta) = 0; \quad (8)$$

$$G(y^i, x_H^i, x_3^i, \theta) \geq 0; \quad (9)$$

$$x_{3j}^i - \psi \sigma_{xj} \leq \overline{x_{3j}^i} \leq x_{3j}^i + \psi \sigma_{xj}; \quad (10)$$

$$y_{3k}^i - \psi \sigma_{yk} \leq \overline{y_{3k}^i} \leq y_{3k}^i + \psi \sigma_{yk}; \quad (11)$$

$$\sigma = (S\alpha)/3, \quad (12)$$

где R – количество рассматриваемых режимов; N – размерность векторов x_3 ; M – размерность векторов y_3 , остальные обозначения те же, что и в выражениях (1)–(6).

Второй этап идентификации необходим, чтобы добиться максимально возможного сближения работы реального оборудования и расчетов математической модели. Целевая функция оптимизационной задачи на данном этапе идентификации (8), в отличие от значения максимальной относительной невязки (1), представляет собой сумму квадратов всех относительных невязок контролируемых параметров во всех рассматриваемых режимах работы оборудования. Следовательно, на втором этапе идентификации можно добиться снижения всех относительных невязок измеряемых контрольных параметров, а не только максимальной относительной невязки, как на первом этапе. Важно подчеркнуть, что значение максимальной относительной невязки контрольных параметров (ψ) фиксируется и убирается из оптимизационной задачи второго этапа идентификации. Данная операция необходима для того, чтобы исключить увеличение максимальной невязки при решении оптимизационной задачи второго этапа идентификации параметров математической модели исследуемой ТЭУ.

После завершения второго этапа идентификации значения настраиваемых коэффициентов математической модели θ фиксируются и не подлежат дальнейшим изменениям, а математическая модель считается настроенной на фактическое состояние оборудования.

3. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ТЭУ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЕЕ МОДЕЛИ

Важно отметить, что среди массива настраиваемых коэффициентов математической модели теплоэнергетического оборудования могут оказаться те, которые не являются постоянными, но меняют свое значение в зависимости от режима работы исследуемого оборудования. Таким образом, при идентификации математических моделей ТЭУ важной является задача учета влияния режима работы на изменение эффективности в некоторых элементах расчетной схемы модели.

Например, известно, что внутренний относительный КПД отсеков турбины не является постоянной величиной, а меняет свое значение в зависимости от нагрузки турбины. Так, в режимах работы, близких к номинальным, он будет выше, чем в режимах с низкой нагрузкой. Такая особенность исследовалась в работе [21], в которой рассматривалась точность общеизвестной методики определения параметров в математических моделях отсеков турбоустановки. В настоящей статье делается вывод, что при снижении нагрузки турбины ошибка вычислений по формуле Стодолы–Флюгеля может достигать 3...5 % в зависимости от режима работы.

В отличие от всех предыдущих работ, где настраивались постоянные внутренние относительные коэффициенты эффективности каждого из отсеков турбины, в настоящей работе предлагается модернизировать математическую модель данного элемента. С целью учета влияния изменения режима работы на эффективность выработки механической мощности отсеком турбоустановки предлагается использовать квадратичные функции, в которых в качестве переменной выступает отношение фактического расхода пара через отсек (G) к номинальному расходу (G^*). Коэффициенты A , B , C уравнения (7) являются общими для каждого из цилиндров турбины (ЦВД, ЦСД, ЦНД), но коэффициенты η_i определяются для каждого отсека в зависимости от нагрузки турбины в разных режимах работы:

$$\eta_i = A \left(\frac{G}{G^*} \right)^2 + B \left(\frac{G}{G^*} \right) + C. \quad (13)$$

Подобный подход можно использовать при моделировании не только отсеков паровой турбины, но и других элементов ТЭУ, где наблюдается влияние изменяющегося режима работы на его эффективность. Например, во многих технологических схемах турбоустановок предусмотрен деаэратор, предназначенный для удаления кислорода и других коррозионно-агрессивных газов из основного конденсата турбины. При этом на некоторых ТЭУ давление в деаэраторе с изменением нагрузки изменяется нелинейно, что необходимо учесть при моделировании этого элемента или идентификации его параметров.

Пусть коэффициент дросселирования пара на входе в деаэратор из отбора турбины k_d является одним из настраиваемых коэффициентов математической модели энергоблока. Вместо его использования как оптимизируемой величины задачи идентификации можно заменить его квадратичной функцией вида

$$k_d = Ax^2 + Bx + C, \quad (14)$$

где x – расход питательной воды в деаэраторе, характеризующий режим работы турбины; A, B, C – новые оптимизируемые коэффициенты.

Такое изменение хотя и немного увеличит размерность решаемой идентификационной задачи, но в то же время позволит настроить математическую модель деаэратора с учетом влияния изменения мощности турбины в различных режимах работы, что улучшит точность идентификации модели всего энергоблока.

3. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕННОЙ НАСТРОЙКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЭУ НА ЕЕ ФАКТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

Очевидно, при идентификации параметров каждой математической модели, построенной для реально существующих агрегатов ТЭС, необходимо удостовериться в достаточной точности настройки математической модели исследуемого оборудования на фактическое его состояние. Более того, оценка точности выполненной идентификации позволит косвенно оценить корректность и точность самой методики. Таким образом, существует необходимость в разработке критериев точности, позволяющих оценить, как точность сближения каждого рассчитываемого на математической модели параметра с его замером (с учетом класса точности датчиков, использованных во время испытаний агрегата), так и общую точность решения задачи идентификации.

В качестве критерия точности в данной работе предлагается использовать модули относительных невязок контрольных параметров (с верхней чертой – параметры, замеряемые на оборудовании, без черты – вычисляемые на модели), рассчитываемых по формулам:

$$k_x^i = \frac{|x_3^i - \overline{x_3^i}|}{\sigma_x}; \quad (15)$$

$$k_y^i = \frac{|y_3^i - \overline{y_3^i}|}{\sigma_y}; \quad (16)$$

$$\sigma = (S\alpha)/3, \quad (17)$$

где x_3 – замеряемые параметры, являющиеся информационно-входными (задаваемыми) для математической модели; y_3 – замеряемые параметры, являющиеся информационно-выходными (вычисляемыми) для математической модели; σ – дисперсии погрешностей датчиков, используемых для получения замеренного значения контрольного параметра, зависящего от класса точности прибора (α) и верхнего значения шкалы прибора (S); i – индекс, указывающий на порядковый номер режима работы оборудования.

Общую точность решения задачи идентификации параметров математической модели ТЭУ можно получить, вычислив сумму модулей относитель-

ных невязок контрольных параметров во всех рассматриваемых режимах, по формуле

$$k = \sum_{i=1}^R \left[\sum_{j=1}^N \frac{|x_{3j}^i - \overline{x_{3j}^i}|}{\sigma_{xj}} + \sum_{k=1}^M \frac{|y_{3k}^i - \overline{y_{3k}^i}|}{\sigma_{yk}} \right], \quad (18)$$

где R – количество рассчитываемых режимов; N – размерность векторов x_3 ; M – размерность векторов y_3 .

Критерий точности k очень удобно использовать в качестве количественной оценки выполненной идентификации параметров математической модели исследуемой ТЭУ. Кроме того, данный критерий помогает оценить увеличение точности настройки математической модели, ставшее доступной благодаря настоящей усовершенствованной методике идентификации. Например, вычислив значение критерия после первого и второго этапов идентификации, можно увидеть, на сколько процентов снизилась суммарная относительная невязка параметров благодаря минимизации целевой функции, выполненной на втором этапе идентификации.

Стоит отметить, что в настоящей работе используется так называемое правило «трех сигм», так как доверительная вероятность в данном случае равняется 0,997 [22, 23]. Это позволяет с достаточным основанием утверждать, что все возможные случайные погрешности измерения, распределенные по нормальному закону распределения погрешностей, практически не превышают по абсолютному значению трех сигм. В уравнениях, рассчитывающих границы вычисляемых на модели измеряемых контролируемых параметров (4) и (5), вместо множителя 3 используется минимизируемый вспомогательный коэффициент ψ , изначально задаваемый большим числом 50–100. Это необходимо для того, чтобы учесть как погрешности используемых средств измерений и ошибочные замеры, так и несовершенство методики расчета и ошибки в математических моделях. В процессе оптимизационного расчета на первом этапе идентификации (1) этот коэффициент стремится к значению 3, но на практике он зачастую принимает несколько большее значение. Таким образом, в предлагаемой методике мы можем оценить, какую дополнительную погрешность привносит в расчет несовершенство нормативных методов расчета и упрощения, закладываемых в математическую модель исследуемой ТЭУ.

4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ЭНЕРГОБЛОКА МОЩНОСТЬЮ 225 МВт

В данной работе в качестве прототипа для математической модели был выбран современный энергоблок, установленный на Харанорской ГРЭС (п. Ясногорск, Забайкальский край). В его состав входит паровая турбоустановка К-225-12,8-3Р мощностью 225 МВт и котельный агрегат высокого давления с промежуточным перегревом пара ЕП-630-13,8-565 БТ паропроизводительностью 630 т/ч. Более подробное описание технологических схем и математических моделей турбоустановки и котельного агрегата приводится в статьях [24, 25].

Математическая модель энергоблока была построена автором с помощью программно-вычислительного комплекса (ПВК) «Система машинного построения программ», разработанного в ИСЭМ СО РАН [26]. Расчетная схема энергоблока состоит из 100 элементов и 169 связей между ними. Полученная математическая модель содержит 1153 информационно-входных и 1388 информационно-выходных параметров, из которых 56 параметров являются итерационно-вычисляемыми и требуют задания начального приближения.

Необходимые для идентификации параметров математической модели энергоблока значения контрольных замеряемых параметров в различных точках расчетной схемы энергоблока были взяты из предоставленной инженерным персоналом электростанции выгрузки показаний датчиков. Класс точности использованных средств измерения составляет: для приборов, измеряющих электрическую нагрузку, – 1 %, давление – 1,5 %, температуру воды и пара – 2 %, расхода воды и пара – 3 %, температуру газов – 5 %.

Для выполнения идентификации параметров математической модели энергоблока были отобраны три установившихся режима работы энергоблока (минимальная нагрузка 125 МВт, нагрузка 227 МВт и максимальная нагрузка 235 МВт). Разница во времени между рассматриваемыми режимами работы энергоблока была минимальной; это необходимо для того, чтобы считать настраиваемые коэффициенты математической модели энергоблока постоянными и минимизировать влияние загрязнений поверхностей нагрева и других факторов на точность выполненной идентификации. Каждый из рассматриваемых режимов работы энергоблока включал в себя 60 замеренных значений контрольных параметров в различных точках технологической схемы, из которых пять замеряемых параметров являются информационно-входными (задаваемыми) для математической модели (x_3) и 55 параметров являются информационно-выходными (вычисляемыми) при расчете математической модели (y_3).

На первом этапе идентификации была сформирована оптимизационная задача (1)–(6), в которой количество оптимизируемых параметров для всех рассматриваемых режимов работы совместно составило 111, а суммарное количество ограничений-неравенств – 951. В качестве целевой функции выступал вспомогательный коэффициент, представляющий собой максимальную относительную невязку среди всех замеряемых контрольных параметров во всех рассматриваемых режимах работы энергоблока.

Массив оптимизируемых параметров состоял из 59 настраиваемых коэффициентов математической модели; $12 \cdot 3 = 36$ не замеряемых на энергоблоке режимных параметров, среди которых присутствовали расход сжигаемого в котле топлива, коэффициент избытка воздуха в топке, впрыски в 4 ступени пароохладителей, напоры основных насосов тракта основного конденсата, регуляторы температуры перегретого пара; $5 \cdot 3 = 15$ замеров контрольных параметров, являющихся информационно-входными (задаваемыми) для математической модели; один минимизируемый вспомогательный коэффициент, представляющий собой максимальную относительную невязку контрольных параметров.

Массив ограничений-неравенств состоял из $120 \cdot 3 = 360$ ограничений на минимальное и максимальное значение рассчитываемых значений кон-

трольных параметров с учетом точности датчиков (4), (5); $192 \cdot 3 = 576$ физических ограничений, включающих в себя неотрицательность расходов теплоносителей во всех элементах модели, ограничения на температурный напор, температурную и механическую прочность элементов котельного агрегата и ряд других; $5 \cdot 3 = 15$ режимных ограничений: на температуру первичного и вторичного пара, мощность турбоустановки, давление в конденсаторе и температуру уходящих газов.

Расчеты, выполненные на первом этапе решения задачи идентификации, выявили ряд замеров контрольных параметров, мешающих снизить значение максимальной относительной невязки. Среди замеров, вызывающих сомнения в своей точности, были отмечены значения давлений на входе в некоторые отсеки турбоустановки, расход пара на входе в конденсатор и значение температуры газов за одним из конвективных пароперегревателей котельного агрегата.

Замеры давления пара, поступающего в 7-й и 9-й отсеки турбины, отсутствовали, также отсутствовал замер температуры на входе в 9-й отсек, так как в данных точках технологической схемы установки не были установлены датчики давления и температуры соответственно, поэтому значения замеров данных параметров были заданы приближенно и были исключены из дальнейших расчетов. Для каждого из рассматриваемых режимов работы энергоблока были построены диаграммы расширения пара в h,s -координатах. Значения давлений и температур для построения данных диаграмм были взяты из выгрузки показаний датчиков, предоставленных с электростанции. Замеры давления на входе во 2-й и 5-й отсеки турбины, как показал инженерный анализ, содержали грубые погрешности измерений, поэтому данные замеры были исключены. Также было принято решение исключить из состава измеряемых параметров расход воды на выходе из конденсатора по причине большого расхождения значений данного параметра в двух режимах. Последний замер, который был исключен из дальнейших расчетов, – замер температуры горячих газов в точке за второй ступенью конвективного пароперегревателя вторичного пара, так как данный замер имел большое расхождение во всех рассматриваемых режимах.

Таким образом, массив измеряемых контрольных параметров после первого этапа идентификации параметров математической модели энергоблока был уменьшен на семь замеров: четыре параметра содержат грубую погрешность измерения, для трех других отсутствуют датчики измерения соответствующих параметров. Решение оптимизационной задачи на втором этапе идентификации позволило минимизировать целевую функцию. Полученное значение целевой функции, равное 3,83, полностью устраивает, так как оно близко к идеальному с точки зрения точности значению 3,0. Максимальная относительная невязка, равная 3,0 или меньше, полностью объясняется заявленной точностью датчиков, использованных для получения замеров. Дополнительную погрешность, равную в данном случае 0,83, можно объяснить несовершенством нормативных методов расчета котельного агрегата и турбоустановки, а также необходимыми допущениями, сделанными в математической модели энергоблока.

Для получения значения критерия точности (17) были просуммированы модули всех относительных невязок измеряемых контрольных параметров во

всех рассматриваемых режимах работы энергоблока. Величина критерия точности после первого этапа идентификации составила 511.

На втором этапе решения задачи идентификации была сформирована оптимизационная задача (8)–(13), в которой количество оптимизируемых параметров составило 110, а суммарное количество ограничений-неравенств – 867. В качестве целевой функции выступала сумма квадратов относительных невязок среди всех параметров во всех рассматриваемых режимах работы исследуемого энергоблока (18).

Массив оптимизируемых параметров состоял из 59 настраиваемых коэффициентов математической модели; $12 \cdot 3 = 36$ не измеряемых на энергоблоке режимных параметров; $5 \cdot 3 = 15$ замеров контрольных параметров, являющихся задаваемыми для математической модели. Массив ограничений-неравенств состоял из $106 \cdot 3 = 318$ ограничений на минимальное и максимальное значение рассчитываемых значений измеряемых контрольных параметров с учетом точности датчиков (11), (12); $178 \cdot 3 = 534$ физических ограничений; $5 \cdot 3 = 15$ режимных ограничений.

Оптимизируемый на первом этапе идентификации вспомогательный коэффициент ψ был исключен из списка оптимизируемых и зафиксирован на значении 3,90. На втором этапе минимизировалась сумма модулей всех относительных невязок во всех рассматриваемых режимах работы энергоблока (8). Это позволило добиться как можно более тесного сближения расчетов, выполняемых на математической модели, и замеров, выполненных на реальном оборудовании, не увеличивая при этом значение максимальной относительной невязки. После минимизации суммы квадратов относительных невязок на третьем этапе значение критерия точности (17) значительно уменьшилось и стало равным 333. Таким образом, суммарная относительная невязка контрольных параметров уменьшилась практически на 35 % (по сравнению с минимизацией только максимальной относительной невязки измеряемых параметров на первом этапе идентификации математической модели энергоблока), что позволило еще более точно настроить математическую модель с учетом реального состояния энергоблока. После завершения третьего этапа идентификации значения настраиваемых коэффициентов математической модели (θ) были зафиксированы, а математическая модель рассматривалась как настроенная на фактическое состояние исследуемого оборудования. Массив коэффициентов состоял из 59 настраиваемых параметров математической модели энергоблока.

В таблице приводятся значения всех контрольных параметров (сверху находится рассчитанное на математической модели значение, снизу – замеренное на энергоблоке). Справа от значений параметров приводятся величины критериев точности для каждого из параметров в трех рассматриваемых режимах работы энергоблока (15), (16), характеризующего, насколько близко рассчитанное значение приблизилось к замеренному. Чем ближе эта величина к нулю, тем меньше относительная невязка соответствующего замера. Заливкой в таблице выделены те параметры, замеры которых отсутствуют (и были заданы приближенно) или были исключены на первом этапе идентификации математической модели энергоблока. Данные замеры не участвовали в оптимизационных вычислениях на втором этапе идентификации.

Результаты расчета, замеры контрольных параметров и значения критериев точности для трех режимов работы исследуемого энергоблока

Calculation results, measurements of control parameters and accuracy criteria values for three operating modes of the power unit under study

№	Название параметра, единица измерения	1-й режим	k_i	2-й режим	k_i	3-й режим	k_i
1	Температура циркуляционной воды перед конденсатором	22,23 22,05	0,536	22,34 21,65	2,063	21,07 21,25	0,526
2	Расход циркуляционной воды перед конденсатором	10253 10211	0,278	10872 10979	0,712	10211 10143	0,451
3	Температура подпиточной воды перед конденсатором	32,2 32,0	0,602	31,0 30,9	0,159	32,3 32,2	0,159
4	Температура воздуха перед трубчатым воздухоподогревателем первой ступени	48,5 46,1	0,747	47,0 48,7	0,493	46,0 49,5	1,026
5	Давление пара после второго отсека турбины	32,75 32,91	0,794	19,38 19,32	0,293	34,12 34,07	0,292
6	Давление пара перед первым отсеком турбины	127,26 128,16	0,723	74,52 70,44	3,262	133,56 132,75	0,700
7	Давление пара перед вторым отсеком турбины	47,48 46,39	3,360	27,73 26,99	2,276	49,45 49,50	0,151
8	Давление пара перед третьим отсеком турбины	27,896 28,590	3,469	16,12 16,00	0,596	28,98 29,69	3,787
9	Давление пара перед четвертым отсеком турбины	15,81 15,82	0,119	9,09 9,17	0,623	16,42 16,41	0,110
10	Давление пара перед пятым отсеком турбины	9,46 9,25	4,118	5,46 4,64	16,42	9,83 9,60	4,856
11	Давление пара перед шестым отсеком турбины	3,85 3,89	2,018	2,26 2,30	2,154	4,01 4,01	0,139
12	Давление пара перед седьмым отсеком турбины	1,25 1,20	3,603	0,73 0,70	2,475	1,31 1,50	13,84
13	Давление пара перед восьмым отсеком турбины	0,92 0,91	1,164	0,54 0,58	3,696	0,96 0,93	3,692
14	Давление пара перед девятым отсеком турбины	0,214 0,170	8,726	0,132 0,100	6,340	0,221 0,160	13,05
15	Давление пара перед конденсатором турбины	0,0686 0,0590	1,912	0,0470 0,0335	2,697	0,0668 0,0575	2,002
16	Температура пара после первого отсека турбины	407,1 411,9	0,904	398,2 400,3	0,395	407,3 412,0	0,884
17	Температура пара после второго отсека турбины	358,7 359,3	0,157	351,0 349,6	0,359	358,4 359,8	0,355
18	Температура пара после третьего отсека турбины	493,3 491,1	0,404	488,9 495,4	1,216	491,4 490,3	0,197
19	Температура пара после четвертого отсека турбины	419,7 435,3	3,899	416,6 432,2	3,899	417,8 415,0	0,698
20	Температура пара после пятого отсека турбины	305,6 298,1	1,866	304,5 307,3	0,696	304,1 301,5	0,656
21	Температура пара после шестого отсека турбины	185,5 177,2	3,114	185,4 175,3	3,798	184,4 187,6	1,182
22	Температура пара после седьмого отсека турбины	162,5 156,9	2,117	162,8 166,8	1,517	161,5 154,8	2,511
23	Температура пара после восьмого отсека турбины	69,9 70,0	0,055	73,3 70,0	2,493	68,6 75,0	4,799
24	Температура пара после девятого отсека турбины	37,8 38,5	0,533	31,4 29,3	1,571	37,4 38,2	0,530
25	Температура циркуляционной воды после конденсатора	29,37 30,20	1,248	26,43 26,35	0,126	28,52 29,5	1,464
26	Температура конденсата после конденсатора	37,2 38,8	2,432	31,1 29,6	2,241	36,8 38,2	2,112
27	Температура основного конденсата после первого подогревателя низкого давления	54,5 55,7	0,895	41,3 46,4	3,861	55,3 55,3	0,027

Продолжение таблицы

Table continuation

№	Название параметра, единица измерения	1-й режим	k_i	2-й режим	k_i	3-й режим	k_i
28	Температура основного конденсата после второго подогревателя низкого давления	96,3 95,4	0,706	82,5 83,9	1,043	97,48 95,7	1,334
29	Температура основного конденсата после третьего подогревателя низкого давления	137,6 139,4	1,368	119,3 122,5	2,391	138,9 139,9	0,719
30	Температура основного конденсата после деаэрата турбины	165,6 164,4	0,901	144,8 148,5	2,763	167,2 164,5	2,052
31	Температура питательной воды после четвертого подогревателя высокого давления	194,7 198,7	1,991	172,7 175,3	1,301	196,1 200,4	2,142
32	Температура питательной воды после пятого подогревателя высокого давления	233,0 236,6	1,800	208,2 209,6	0,720	234,8 238,8	2,013
33	Температура питательной воды после шестого подогревателя высокого давления	255,1 261,9	3,411	227,1 230,5	1,719	257,4 264,3	3,471
34	Электрическая мощность, вырабатываемая на клеммах электрогенератора турбины	225,09 227,09	2,398	128,16 124,98	3,820	235,12 235,73	0,730
35	Температура питательной воды после охладителя собственного конденсата котла	273,7 269,6	2,067	255,1 249,0	3,061	270,7 263,9	3,413
36	Температура пара после водяного экономайзера высокого давления	337,3 332,7	1,738	324,3 332,7	3,152	337,3 327,4	3,713
37	Давление насыщенного пара после барабана котла	167,75 166,95	0,636	146,20 144,17	1,623	172,7 172,2	0,435
38	Температура пара перед радиационным пароперегревателем	358,2 358,2	0,012	352,5 360,1	2,286	359,3 358,1	0,351
39	Температура пара после радиационного пароперегревателя	417,1 413,3	1,138	438,8 436,3	0,738	410,2 407,6	0,782
40	Температура пара после впрыска в пароохладитель первой ступени	397,7 399,2	0,376	400,1 401,5	0,358	399,3 405,6	1,568
41	Температура пара после первого ряда среднего ширмового пароперегревателя	447,1 444,6	0,623	457,2 454,4	0,698	446,7 446,5	0,060
42	Температура пара после первого ряда крайнего ширмового пароперегревателя	498,4 494,3	1,019	513,0 506,6	1,602	496,2 492,8	0,859
43	Температура пара после впрыска в пароохладитель второй ступени	483,7 483,7	0,012	492,9 493,7	0,189	484,0 488,9	1,224
44	Температура пара после второго ряда среднего ширмового пароперегревателя	503,2 501,3	0,483	511,9 512,5	0,140	503,0 504,9	0,464
45	Температура пара после второго ряда крайнего ширмового пароперегревателя	524,5 518,4	1,516	532,9 528,4	1,135	523,7 522,7	0,261
46	Температура пара после впрыска в пароохладитель третьей ступени	508,2 509,5	0,334	520,8 519,4	0,341	508,3 512,1	0,943
47	Температура пара после конвекционного пароперегревателя	565,4 566,3	0,222	566,8 566,9	0,036	565,5 566,8	0,322
48	Температура пара после первой ступени промежуточного перегрева пара	478,1 481,3	0,801	480,6 485,8	1,297	477,2 476,8	0,094
49	Температура пара после впрыска в пароохладитель низкого давления	404,4 410,6	1,543	440,7 441,7	0,254	410,9 417,4	1,618
50	Температура пара после второй ступени промежуточного перегрева пара	516,9 514,2	0,669	531,4 528,9	0,630	522,5 515,2	1,822
51	Температура пара после третьей ступени промежуточного перегрева пара	584,1 568,5	3,888	578,0 568,7	2,327	582,2 567,6	3,656
52	Температура пара после водяного экономайзера низкого давления	111,1 109,2	1,420	98,9 101,3	1,785	112,1 107,9	3,134
53	Температура газов после трубчатого воздухоподогревателя первой ступени	155,1 149,3	1,767	131,8 139,9	2,417	156,0 146,1	2,983
54	Температура воздуха после трубчатого воздухоподогревателя второй ступени	324,9 328,1	0,588	289,0 304,0	2,804	328,4 321,0	1,400
55	Расход первичного пара после котла	175,7 184,2	3,398	102,21 101,96	0,099	184,76 186,61	0,740
56	Расход смеси конденсата и подпиточной воды после конденсатора	134,40 154,07	9,838	79,00 77,74	0,629	140,14 161,17	10,52

Окончание таблицы

End of table

№	Название параметра, единица измерения	1-й режим	k_i	2-й режим	k_i	3-й режим	k_i
57	Температура газов после конвективного пароперегревателя высокого давления	775,4 696,7	1,218	661,3 650,1	0,269	753,1 703,4	1,244
58	Температура газов после пароперегревателя промперегрева второй ступени	545,6 458,5	2,614	488,1 447,1	1,231	557,5 457,1	3,014
59	Температура газов после пароперегревателя промперегрева первой ступени	382,0 339,6	1,590	338,7 313,3	0,954	386,2 332,4	2,018
60	Температура газов после водяного экономайзера высокого давления	219,2 207,0	0,613	188,1 192,5	0,217	221,4 202,4	0,952

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье было приведено описание разработанной авторами усовершенствованной методики идентификации параметров математических моделей существующего теплоэнергетического оборудования по результатам испытаний и замеров контрольных параметров. Данная методика, как показали расчеты, позволяет более эффективно а) выявлять грубые погрешности измерений контрольных параметров, используемых для идентификации математической модели исследуемого оборудования; б) оценивать корректность и исправлять ошибки построения самой математической модели и в) повысить точность решения задачи идентификации. Также был предложен подход к учету влияния изменения режима работы ТЭУ на эффективность отдельных элементов математической модели при ее идентификации.

Кроме того, в статье было приведено описание критериев, позволяющих оценить точность решения задачи идентификации математических моделей как для отдельных замеров контрольных параметров, так и для суммарной невязки всех параметров во всех рассматриваемых режимах работы. Предлагаемая методика позволяет оценить, какую дополнительную погрешность привносит несовершенство нормативных методов расчета и допущения, выполненные в математической модели исследуемой ТЭУ в дополнение к погрешностям, обусловленным точностью датчиков, использованных во время испытаний оборудования.

Усовершенствованная методика идентификации математических моделей ТЭУ была апробирована на построенной автором подробной математической модели современного энергоблока мощностью 225 МВт. В статье были приведены результаты решения задачи идентификации математической модели энергоблока с указанием замеренных и рассчитанных значений контрольных параметров в трех режимах работы энергоблока и достигнутой точности настройки данной модели на его фактическое состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ноздренко Г.В., Овчинникова Ю.В., Алтухов И.М. Согласование энергобалансов для уточнения исходной информации по ТЭУ // Управление режимами и развитием ЭС в условиях АСУ: сборник трудов. – Новосибирск, 1980. – С. 151–159.

2. Ноздренко Г.В., Овчинникова Ю.В. Оптимизация внутростанционных режимов ТЭЦ в системе АСУ ТП // Задачи и методы управления ЭС: сборник трудов. – Новосибирск, 1982. – С. 21–27.

3. Крохин Г.Д., Супруненко М.Я. Диагностика состояния энергоустановок ТЭС (постановка экспериментов) // Труды третьей международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-96». – Новосибирск, 1996. – Т. 5. – С. 105–111.
4. Оценивание состояния в электроэнергетике / А.З. Гамм, Л.Н. Герасимов, И.И. Голуб, Ю.А. Гришин, И.Н. Колосок. – М.: Наука, 1983. – 302 с.
5. Гамм А.З., Колосок И.Н. Обнаружение плохих данных в телеизмерениях для АСДУ ЭЭС на основе контрольных уравнений / Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. – Препринт. – Иркутск, 1998. – 49 с.
6. Оценивание состояния электроэнергетической системы: алгоритмы и примеры решения линеаризованных задач / Л.А. Гурина, В.И. Зоркальцев, И.Н. Колосок, Е.С. Коркина, И.В. Мокрый. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2016. – 37 с.
7. Новицкий Н.Н. Оценивание параметров гидравлических цепей. – Новосибирск: Наука, 1998. – 214 с.
8. Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации / Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН ; отв. ред. Н.Н. Новицкий. – Новосибирск: Наука, 2007. – 258 с.
9. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., испр. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 303 с.
10. Деканова Н.П., Клер А.М. Проблемы оптимизации при исследовании теплоэнергетических установок // Приближенные методы анализа и их приложения. – Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1989. – С. 22–43.
11. Клер А.М., Деканова Н.П., Михеев А.В. Задачи оптимизации при оперативном управлении режимами работы ТЭЦ // Методы оптимизации и их приложения: тезисы докладов 10-й Байкальской школы семинара. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1995. – С. 80–84.
12. Михеев А.В. Оценивание состояния и идентификация параметров парового котла ТП-81 (ТЭЦ-9) // Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 1999. – Вып. 29. – С. 143–148.
13. Деканова Н.П., Михеев А.В. Обнаружение плохих измерений параметров функционирования ТЭЦ // Методы оптимизации и их приложения: материалы 11-й Байкальской школы семинара. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1998. – С. 79–82.
14. Клер А.М., Максимов А.С., Степанова Е.Л. Методика построения быстродействующих математических моделей турбин для задач оперативной оптимизации режимов работы ТЭЦ // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты / под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – Вып. 9. – С. 85–99.
15. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. High-speed mathematical models of cogeneration steam turbines: optimization of operation in heat and power plants // Thermophysics and Aeromechanics. – 2006. – Vol. 13, N 1. – P. 143–150.
16. Оперативная оценка состояния основного оборудования ТЭС / А.М. Клер, А.С. Максимов, Е.Л. Степанова, П.В. Жарков // Электрические станции. – 2011. – № 4. – С. 2–6.
17. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Optimizing the operating modes of cogeneration stations taking actual state of main equipment into account // Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 56, N 6. – P. 500–505.
18. Multimodal optimization: an effective framework for model calibration / M. Chica, J. Barranquero, T. Kajdanowicz, S. Damas, Ó. Cordon // Information Sciences. – 2017. – Vol. 375. – P. 79–97. – DOI: 10.1016/j.ins.2016.09.048.
19. Salahshoor K., Khoshro M.S., Kordestani M. Fault detection and diagnosis of an industrial steam turbine using a distributed configuration of adaptive neuro-fuzzy inference systems // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2011. – Vol. 19, iss. 5. – P. 1280–1293.
20. Jiang X., Liu P., Li Z. Data reconciliation for steam turbine on-line performance monitoring // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 70, iss. 1. – P. 122–130. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.007.
21. Liu J., Yan S., Zeng D. A new measurement model for main steam flow of power plants // Procedia Environmental Sciences. – 2011. – Vol. 11. – P. 18–24. – DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.004.
22. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. – М.: Наука, 1976. – 220 с.
23. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2012. – 816 с.
24. Алексеюк В.Э. Разработка математической модели котлоагрегата ТПЕ-216М с применением метода Ньютона // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 19–22 апреля 2016 г. – Иркутск, 2016. – С. 324–328.

25. Алексеюк В.Э. Усовершенствование методики идентификации математических моделей по результатам испытаний на примере конденсационной турбоустановки // Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2017. – Вып. 47. – С. 42–55.

26. Kler A.M., Mai V.A., Skripkin S.K. A system for computer-based creation of static and dynamic mathematical models of thermal power plants // Expert systems and computer simulation in energy engineering: selected papers from the second international forum. – Erlangen, Germany, 1992. – P. 22-4-1–22-4-3.

Клер Александр Матвеевич, заведующий отделом теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, доктор технических наук, профессор. Основное направление научных исследований – математическое моделирование и оптимизация теплосиловых установок. E-mail: kler@isem.irk.ru

Алексеюк Виталий Эдуардович, аспирант, инженер отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Основное направление научных исследований – математическое моделирование и идентификация математических моделей теплоэнергетического оборудования. E-mail: alexeyuk.vitaliy@yandex.ru

Kler Alexander Matveevich, head of the department of heat power systems in the Institute of Energy Systems named after L.A., Melentyeva, SB RAS, D.Sc. (Eng.), professor. The main field of his scientific research is mathematical modeling and optimization of heat power plants. E-mail: kler@isem.irk.ru

Alekseyuk Vitaliy Eduardovich, a graduate student, an engineer at the department of heat power systems of the Institute of Energy Systems named after L.A., Melentyeva, SB RAS. The main field of his scientific research is mathematical modeling and identification of mathematical models of heat power equipment. E-mail: alexeyuk.vitaliy@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-57-76

Improving the accuracy of identifying mathematical model parameters of the existing thermal power equipment*

A.M. KLER^a, V.E. ALEKSEYUK^b

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation

^a kler@isem.irk.ru ^b alexeyuk.vitaliy@yandex.ru

Abstract

A real state of thermal power equipment at thermal power plants is known to change in the process of operation. Thus, the task of the estimation of main thermal power equipment state is important in the on-line control of power plant operating conditions. Modern thermal power units, such as boiler units and steam turbines, are engineering systems with rather complex engineering flow diagrams, diverse elemental compositions and operation conditions. Hence, the main instruments to study thermal power equipment are the methods of mathematical modeling and optimization of its schemes and parameters. The problems of estimating the thermal power system operating condition and identification of mathematical model parameters have not been properly solved due to the complexity of objects of studies and their mathematical models, and the lack of effective methods, algorithms and computer programs to solve the required mathematical tasks. The results of solving the above problems are of importance by themselves and play a large part in the qualitative solution to thermal power units' control problems, e.g., the tasks of optimal load distribution among the thermal power plant units and optimal control of thermal power unit operating conditions. The paper describes an improved technique for identification (adjustment) of mathematical models for modern main thermal power equipment. The technique allows us to reveal

* Received 30 January 2019.

The research was carried out under State Assignment, Project 17.1.4 (registration no. AAAA-A17-117030310449-7) of the Fundamental Research of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

more effectively the gross errors in measurements of control parameters used to identify the mathematical model of the equipment under study, to evaluate the correctness and correct the errors in constructing the mathematical model itself and improve the accuracy of identification. Among other things, the paper discusses the issue of assessing the accuracy of identifying the parameters of mathematical models of heat and power equipment, depending on the accuracy of measurements of control parameters used to set up the model, as well as on the correctness of the construction of the mathematical model itself and the calculation method used.

Keywords: Identification of parameters, mathematical modeling, accuracy criterion, measured control parameters, model adjustment, real-time control, relative discrepancies, operating conditions, state estimation, coal-fired generating unit

REFERENCES

1. Nozdrenko G.V., Ovchinnikova Yu.V., Altukhov I.M. Soglasovanie energobalansov dlya utochneniya iskhodnoi informatsii po TEU [Coordination of energy balances to clarify the initial information on the thermal power plant]. *Upravlenie rezhimami i razvitiem ES v usloviyakh ASU* [Management of modes and development of the electrical system in an automatic control system]. Novosibirsk, 1980, pp. 151–159.
2. Nozdrenko G.V., Ovchinnikova Yu.V. Optimizatsiya vnutristantsionnykh rezhimov TETs v sisteme ASU TP [Optimization of CHPP in-plant modes in the automated process control system]. *Zadachi i metody upravleniya ES* [Problems and methods of power plant control]. Novosibirsk, 1982, pp. 21–27.
3. Krokhin G.D., Suprunenko M.Ya. [Diagnostics of TPP power facility condition (experiment set up)]. *Trudy tret'ei mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya APEP-96"* [Proceedings of Third international scientific-technical conference "Actual problems of electronic instrument engineering" APEIE-96], Novosibirsk, 1996, vol. 5, pp. 105–111. (In Russian).
4. Gamm A.Z., Gerasimov L.N., Golub I.I., Grishin Yu.A., Kolosok I.N. *Otsenivanie sostoyaniya v elektroenergetike* [Evaluation of the state of the power industry]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 302 p.
5. Gamm A.Z., Kolosok I.N. *Obnaruzhenie plokhikh dannykh v teleizmereniyakh dlya ASDU EES na osnove kontrol'nykh uravnenii* [Bad data detection in telemetry for automated dispatch control system of electric power system based on control equations]. Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS. Irkutsk, 1998. 49 p.
6. Gurina L.A., Zorkal'tsev V.I., Kolosok I.N., E.S. Korkina, I.V. Mokryi. *Otsenivanie sostoyaniya elektroenergeticheskoi sistemy: algoritmy i primery resheniya linearizovannykh zadach* [Evaluation of the state of the electric power system: algorithms and examples of solving linearized problems]. Irkutsk, Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS Publ., 2016. 37 p.
7. Novitskii N.N. *Otsenivanie parametrov gidravlicheskikh tsepei* [Estimation of hydraulic circuit parameters]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1998. 215 p.
8. Novitskii N.N., ed. *Truboprovodnye sistemy energetiki. Metody matematicheskogo modelirovaniya i optimizatsii* [Pipeline energy systems. Methods of mathematical modeling and optimization]. Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 258 p.
9. Novitskii P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostei rezul'tatov izmerenii* [Estimation of measurement errors]. 2nd ed. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991. 303 p.
10. Dekanova N.P., Kler A.M. Problemy optimizatsii pri issledovanii teploenergeticheskikh ustanovok [Optimization problems in the study of thermal power plants]. *Priblizhennyye metody analiza i ikh prilozheniya* [Approximate analysis methods and their applications]. Irkutsk, Siberian Energy Institute Publ., 1989, pp. 22–43.
11. Kler A.M., Dekanova N.P., Mikheev A.V. [Optimization tasks at dispatching control of CHP operation modes]. *Metody optimizatsii i ikh prilozheniya: tezisy dokladov 10-i Baikalskoi shkoly seminarov* [Optimization methods and their uses: abstracts of the 10th Baikal school workshop]. Irkutsk, 1995, pp. 80–84. (In Russian).
12. Mikheev A.V. Otsenivanie sostoyaniya i identifikatsiya parametrov parovogo kotla TP-81 (TETs-9) [State estimation and parameter identification of the steam boiler TP-81 (CHP-9)]. *Sistemnyye issledovaniya v energetike: trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN* [Systems researches in the energy sector. Works of young scholars of ESI SB RAS]. Irkutsk, 1999, iss. 29, pp. 143–148.
13. Dekanova N.P., Mikheev A.V. [Detection of bad measurements of CHP operation parameters]. *Metody optimizatsii i ikh prilozheniya: materialy 11-i Baikalskoi shkoly seminarov* [Optimization methods and their uses. Materials of 11th Baikal school workshop]. Irkutsk, 1998, pp. 79–82. (In Russian).

14. Kler A.M., Maksimov A.S., Stepanova E.L. Metodika postroeniya bystrodeistvuyushchikh matematicheskikh modelei turbin dlya zadach operativnoi optimizatsii rezhimov raboty TETs [The method of constructing high-speed mathematical models of turbines for problems of operational optimization of operating modes of CHP]. *Energosistemy, elektrostantsii i ikh agregaty* [Power systems, power plants and their units]. Novosibirsk, 2005, vol. 9, pp. 85–99.
15. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. High-speed mathematical models of cogeneration steam turbines: optimization of operation in heat and power plants. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 143–150.
16. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L., Zharkov P.V. Operativnaya otsenka sostoyaniya osnovnogo oborudovaniya TES [Operational assessment of the condition of the main equipment of thermal power plants]. *Elektricheskie stantsii – Power Plants*, 2011, vol. 4, pp. 2–6.
17. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Optimizing the operating modes of cogeneration stations taking actual state of main equipment into account. *Thermal Engineering*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 500–505.
18. Chica M., Barranquero J., Kajdanowicz T., Damas S., Cordon Ó. Multimodal optimization: an effective framework for model calibration. *Information Sciences*. 2017, vol. 375, pp. 79–97. DOI: 10.1016/j.ins.2016.09.048.
19. Salahshoor K., Khoshro M.S., Kordestani M. Fault detection and diagnosis of an industrial steam turbine using a distributed configuration of adaptive neuro-fuzzy inference systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2011, vol. 19, iss. 5, pp. 1280–1293.
20. Jiang X., Liu P., Li Z. Data reconciliation for steam turbine on-line performance monitoring. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 70, iss. 1, pp. 122–130. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.007.
21. Liu J., Yan S., Zeng D. A new measurement model for main steam flow of power plants. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, vol. 11, pp. 18–24. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.004.
22. Gamm A.Z. *Statisticheskie metody otsenivaniya sostoyaniya elektroenergeticheskikh sistem* [Statistical methods for assessing the state of electric power systems]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 220 p.
23. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* [Applied mathematical statistics]. Moscow Fizmatlit Publ., 2012. 816 p.
24. Alekseiuk V.E. [Development of a mathematical model of the boiler TPE-216M using the Newton method]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: materialy Vserossiyskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation "Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia"], Irkutsk, 19–22 April 2016, pp. 324–328. (In Russian).
25. Alekseiuk V.E. Uovershenstvovanie metodiki identifikatsii matematicheskikh modelei po rezul'tatam ispytaniy na primere kondensatsionnoi turbostanovki [Improving identification methods of mathematical models based on the test results of a condensing turbine unit]. *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN* [Systems researches in the energy sector. Works of young scholars of ESI SB RAS]. Irkutsk, 2017, iss. 47, pp. 42–55.
26. Kler A.M., Mai V.A., Skripkin S.K. A system for computer-based creation of static and dynamic mathematical models of thermal power plants. *Expert systems and computer simulation in energy engineering: selected papers from the second international forum*, Erlangen, Germany, 1992, pp. 22-4-1–22-4-3.

Для цитирования:

Клер А.М., Алексеюк В.Э. Повышение точности идентификации параметров математических моделей существующего теплоэнергетического оборудования // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 57–76. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-57-76.

For citation:

Kler A.M., Alekseyuk V.E. Povyshenie tochnosti identifikatsii parametrov matematicheskikh modelei sushchestvuyushchego teploenergeticheskogo oborudovaniya [Improving the accuracy of identifying mathematical model parameters of the existing thermal power equipment]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 57–76. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-57-76.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 004.932.2

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-77-86

Алгоритм отслеживания и выделения движущихся объектов в видеопотоке^{*}

К.П. ЛОШАКОВ^а, Т.Е. МАМОНОВА^б

634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

^а kp12@tpu.ru ^б stepte@tpu.ru

Актуальность представленной работы определяется потребностью в создании автоматических охранных систем в местах скопления людей, обнаруживающих подозрительное поведение человека, которое проявляется в резких движениях. Это необходимо в целях предупреждения потенциальной опасности и принятия впоследствии соответствующих мер. Разработаны две программы по слежению за объектами (примером объектов в данной статье являются люди), изменяющими свое положение в кадре, с выделением их в обрамляющие прямоугольники. Описаны алгоритм сравнения двух кадров из видеопотока и обрамление в прямоугольник людей, изменивших свое положение в кадре. Созданный алгоритм позволяет обрабатывать вплоть до 17 пар кадров в секунду, что означает применимость алгоритма в задачах реального времени. Установлено, что задание минимальной высоты объекта для определения именно человека как объекта, который будет обрамлен прямоугольником, является необходимой частью алгоритма для исключения выделения шумов как подвижных объектов. Показан высокий результат по точности и времени выделения объектов в задачах реального времени при использовании предложенного алгоритма.

Ключевые слова: OpenCV, python, алгоритм слежения объекта, сравнение кадров, обработка изображения в реальном времени, BackgroundSubstractionMOG2, numpy, MaskR-CNN

ВВЕДЕНИЕ

С увеличением количества камер на улицах, в переулках, торговых центрах и прочих местах растет возможность записывать всё, что происходит в месте видеосъемки. Соответственно, появляется возможность применения технического зрения для решения ряда задач, основанных на анализе видеопотока [1]. Особенность внедрения технического зрения заключается в возможности анализа видеопотока. Например, решение задачи слежения за изменениями обстановки в кадре (появление объекта, его движение), что

^{*} Статья получена 03 марта 2019 г.

напрямую связано с возможностью обнаружения подозрительного поведения человека в кадре, находящегося в магазине, в банке, в аэропорту или в другом общественном месте. На основе анализа видеопотока предпринимаются конкретные действия (например, отсылка информации о подозрительном поведении объекта в пункт охраны заведения). Другая целевая задача – определение скорости перемещения автомобилей по автомагистрали для контроля соблюдения водителями правил скоростного движения [2]. Также техническое зрение используется для создания эффективных систем автоматизированного контроля технологических процессов с целью обеспечения заданных показателей точности и быстродействия [3].

В целом техническое зрение охватило огромное количество разнообразных сфер жизни человека – от промышленности до сельского хозяйства и медицины [4–6].

Настоящая работа предлагает алгоритм для слежения за изменяющими свое положение в кадре объектами путем заключения их в прямоугольные области.

Известно, что для решения подобных задач применяются каскады Хаара [7]. Цель применения состоит в нахождении определенного объекта на изображении. В рамках представляемой работы выполняется сравнение разницы между кадрами и выделение именно объектов, изменяющих положение через установленный промежуток времени. Время выполнения алгоритма программы составляет 0,058 секунды. Можно уменьшить время обработки, используя сочетание CPU + GPU с планировщиком (scheduler) [8]. В качестве другого и, возможно, более быстродействующего алгоритма для распознавания движений в кадре может быть применен метод k -ближайших соседей. Метод в данной статье может быть не всегда пригоден в случае динамического заднего плана, но конкретных исследований не проводилось [9]. В сравнении с методом использования каскада Хаара не нужно подготавливать примеры позитивных и негативных изображений, то есть не нужно использовать определенные инструменты, при использовании которых на выходе создаются XML-файлы, которые затем обрабатываются командами классификатора каскадов [10, 11].

1. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА НАХОЖДЕНИЯ КООРДИНАТ ПРЯМОУГОЛЬНИКОВ, ОБРАМЛЯЮЩИХ ОБЪЕКТЫ

Предлагаемый в рамках работы алгоритм слежения предназначен для обнаружения людей в помещении. Он является универсальным, и его можно использовать для определения людей или других движущихся объектов в различных местах съемки.

Обобщенная блок-схема алгоритма программы движущихся объектов представлена на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная блок-схема алгоритма программы нахождения движущихся объектов

Fig. 1. Block-diagram of the moving object detection algorithm

Основные этапы алгоритма, блок-схема которого показана на рис. 1, следующие.

Вычитание заднего фона с помощью применения алгоритма `BackgroundSubtractorMOG2` библиотеки `OpenCV` к двум кадрам [12–14].

Устранение шумов с использованием морфологической трансформации `morphologyEx` библиотеки `OpenCV` с параметром `MORPH_OPEN`.

Определение кривых на изображении, вдоль которых происходит резкое изменение яркости или других видов неоднородностей с помощью алгоритма определения границ `Canny` библиотеки `OpenCV`.

Написание кода программы для разбиения матрицы пикселей кадра на зоны вдоль горизонта, в которых находятся границы объектов. Поиск в зонах границ с учетом того, что в зоне может находиться несколько объектов.

Для эффективных численных вычислений при работе с матрицей пикселей изображения используется библиотека `Numpy` [15]. Сначала создается матрица-строка, заполненная нулями, которая впоследствии проходит вдоль изображения по горизонтали, находя и записывая в новый `numpy` массив индексы столбцов, в которых какое-либо значение не равно нулю. Если размер нового массива не равен нулю, то начинается цикл, который выполняется, пока значение инкрементирующейся переменной не достигнет величины длины размерности массива индексов. В данном цикле осуществляется запись граничных индексов объектов по горизонтали. Величина дистанции между объектами может быть задана пользователем. После обнаружения границ всех объектов или группы объектов по горизонтали происходит выделение сегмента кадра, в котором находится объект. Далее происходят операции, аналогичные тем, что проводились при нахождении границ по горизонтали. В конечном счете происходит запись в лист координат точек крайнего левого верхнего и крайнего правого нижнего углов объекта или группы объектов. После нахождения всех объектов алгоритм возвращает список координат (четырех точек) всех обрамляющих объекты прямоугольников.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА

Для исследования эффективности предлагаемого алгоритма было обработано видео длительностью 150 секунд с шириной кадра 1280 пикселей и высотой кадра 720 пикселей.

Выбрано видео высокой четкости (HD) для оценивания быстродействия алгоритма при обработке с популярным форматом.

На рис. 2 представлены примеры кадров, которые обрабатываются с применением разработанного алгоритма, реализованного на языке python. Данный язык программирования имеет множество библиотек как для решения задач технического зрения, так и для анализа данных и машинного обучения.



Рис. 2. Пример кадров для обработки

Fig. 2. A sample of frames to process

В соответствии с обобщенной блок-схемой алгоритма 2-й этап включает обработку изображений. На рис. 3 представлено необработанное (рис. 3, а) и обработанное от шумов (рис. 3, б) изображение.

Переход от изображения, указанного на рис. 3, а, к изображению рис. 3, б, произведен при помощи функции библиотеки OpenCV 'morphologyEx', которая была использована для удаления внешних шумов. За шум были приняты контуры на рис. 3, а, размер которых меньше чем 10×10 пикселей. На рис. 4 представлены результаты обработки изображений.

Рис. 4, а и б представляют два кадра, между которыми происходит поиск разницы изображений. Рис. 4, в иллюстрирует определение объектов по границам их контуров. Стоит заметить, что незначительные части (нижняя часть контура по центру изображения) не выделяются, поскольку алгоритм предусматривает определенные минимальные размеры объекта по высоте. Рис. 4, г – результат обработки изображений.

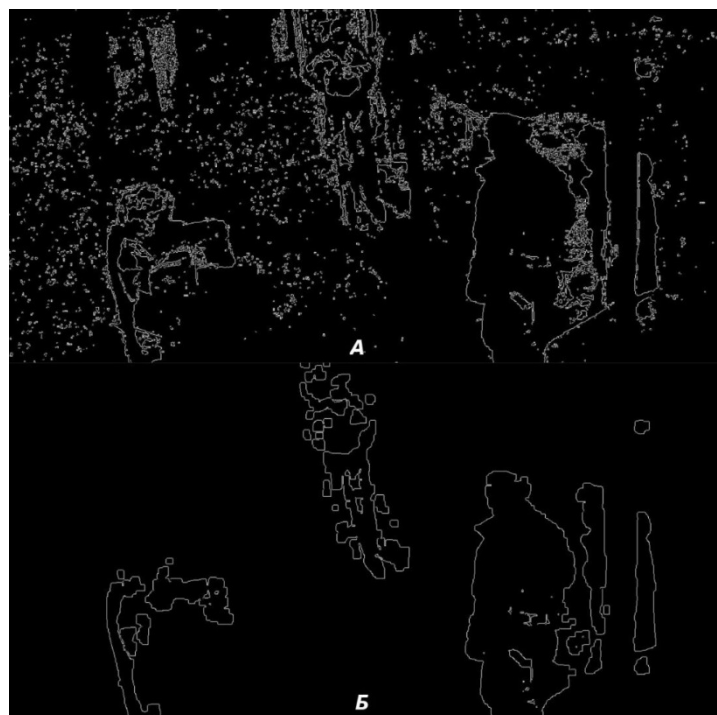


Рис. 3. Пример удаления шумов
Fig. 3. An example of noise deletion

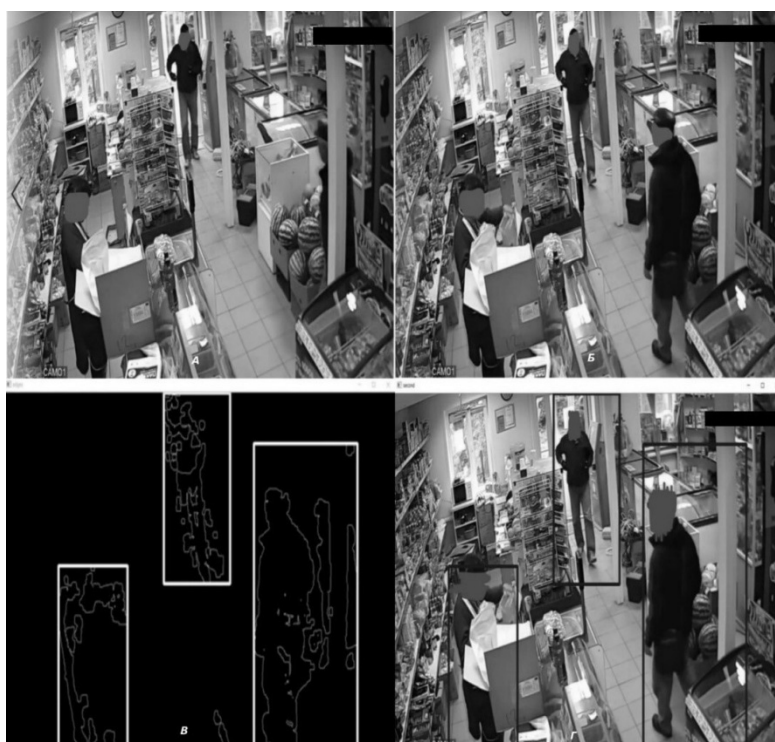


Рис. 4. Результат обработки изображений
Fig. 4. The result of frames processing

Таким образом, в ходе работы алгоритма было замечено, что при низкой динамике объектов алгоритм не находит разницы. Это связано со следующим. При низкой скорости изменения объектом положения в кадре между двумя кадрами есть малые отличия, которые распознаются алгоритмом как шум и устраняются. Для решения данной проблемы предлагается увеличить временной промежуток между двумя сравниваемыми кадрами.

Точность выделения людей, изменяющих свое положение в кадре, составила не менее 85 %. Время выполнения алгоритма составляет 0,058 секунды (среднее время выполнения алгоритма за 1000 вызовов).

3. СРАВНЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМОВ НАХОЖДЕНИЯ КООРДИНАТ ПРЯМОУГОЛЬНИКОВ, ОБРАМЛЯЮЩИХ ОБЪЕКТЫ

Дополнительно был разработан алгоритм, реализация которого имела ту же схему, что и на рис. 1, но при реализации нахождения обрамляющих объектов прямоугольников использовалась функция `findContours` библиотеки `OpenCV`. Цель данной функции заключается в определении координаты контуров. Затем с помощью функции `boundingRect` определялись крайние точки обрамляющих контуры прямоугольников. Далее был написан алгоритм по слиянию пересекающихся прямоугольников. В результате время выполнения всего алгоритма составила 0,061 секунды. От дополнительного алгоритма было принято отказаться, поскольку время выполнения оказалось больше. Существует и другой подход к решению задачи выделения объектов, реализованный с помощью каскада Хаара библиотеки `OpenCV`, но время выполнения данного алгоритма дольше на 0,032 секунды, чем работа основного алгоритма, описанного в настоящей статье [16].

Аналогичную задачу можно также решить при помощи нейронных сетей, например при обучении с учителем, используя готовую модель из репозитория `TensorFlowobjectdetectionAPI` [17–20]. Время обработки изображения зависит от выбранной предобученной модели [21]. Стоит заметить, что время обработки изображения у некоторых моделей меньше по сравнению с временем обработки изображения описанной в данной статье программы. Существенное отличие между такими подходами, как использование нейронных сетей и алгоритма, описанного в данной программе, заключается в том, что нейронные сети, как правило, решают задачу нахождения и классификации объектов в каждом кадре, в то время как описанный алгоритм нацелен на нахождение объекта только при изменении его положения через установленный пользователем промежуток времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был предложен алгоритм выделения изменяющих свои положения людей в видеопотоке. Для проведения экспериментального исследования была разработана и протестирована программа слежения и выделения движущихся объектов.

В итоге можно сделать следующие выводы.

1. Время сравнения двух кадров составляет 0,058 секунды, что означает возможность использования программы в задачах реального времени.

2. Точность не менее 85 % при съемке внутри помещения.

3. Универсальность, которая проявляется в возможности настраивать параметры под разные среды съемки и выделять разные объекты (например, для фиксирования автомобилей, движущихся по автомагистрали с превышенной скоростью).

Один из недостатков разработанного алгоритма относительно использования нейронных сетей заключается в настройке параметров алгоритма программы под определенную среду видеосъемки.

Динамический фон изображений также может повлиять на точность выполнения программы из-за увеличения количества и размера шумов.

Указанные недостатки не являются критичными при решении задач в помещении или иной среде, где отсутствует или имеется только низкая динамичность заднего фона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prasad P.B. Machine vision systems and image processing with applications // Journal of Innovation in Computer Science and Engineering. – 2013. – Vol. 2 (2). – P. 1–4.
2. Luvizon D.C., Nassu B.T., Minetto R. Vehicle speed estimation by license plate detection and tracking [Electronic resource] // 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – Florence, Italy, 2014. – P. 6563–6567. – URL: https://www.researchgate.net/publication/262067228_Vehicle_speed_estimation_by_license_plate_detection_and_tracking (accessed: 15.09.2019).
3. Методы вычитания фона в системе управления технологическим процессом [Электронный ресурс] / М.П. Шлеймович, М.В. Медведев, С.А. Ляшева, А.П. Кирпичников // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 13. – С. 166–170. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/metody-vychitaniya-fona-v-sisteme-upravleniya-tehnologicheskim-protssom> (дата обращения: 15.09.2019).
4. Ke Xia, Zhengxin Weng. Workpieces sorting system based on industrial robot of machine vision // 2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). – Shanghai, China, 2016. – P. 422–426.
5. Лошаков К.П. Разработка системы компьютерного зрения для сельскохозяйственной техники // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2018. – С. 340–341.
6. Surface defect detection of plaster coating based on machine vision / H. Wu, H. Luo, W. Zhu, Y. Wang, Q. Zhang, B. Ma, Y. Yang, H. Fan, H. Xu // 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). – Beijing, China, 2017. – P. 277–281.
7. Govardhan P., Pati U.C. NIR image based pedestrian detection in night vision with cascade classification and validation // 2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies. – Ramanathapuram, India, 2014. – P. 1435–1438.
8. Pertsau D., Uvarov A. Face detection algorithm using haar-like feature for GPU architecture // 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). – Berlin, Germany, 2013). – P. 726–730.
9. Bradsky G., Kaehler A. Learning OpenCV. – Sebastopol, CA: O'Reilly, 2008. – ISBN 978-0-596-51613-0.
10. Localization of white blood cell images using Haar cascade classifiers [Electronic resource] / Reza Aditya Maulana Budiman, Balza Achmad, Faridar, Agus Arif, Nopriadi, Luthfi Zharif // 2016 1st International Conference on Biomedical Engineering (IBIOMED). – Yogyakarta, Indonesia, 2016. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=7869822> (accessed: 19.09.2019).
11. The structure of the XML file generated: understanding the XML file [Electronic resource]. – 2017. – URL: https://knowledge.exlibrisgroup.com/Primo/Product_Documentation/Technical_Guide/050Matching_Records_in_the_Serials_and_Non-Serials_Dedup_Algorithm/030Structure_of_the_XML_File (accessed: 15.09.2019).

12. Review and evaluation of commonly-implemented background subtraction algorithms // Y. Benezeth, P.M. Jodoin, B. Emile, H. Laurent, C. Rosenberger // 2008 19th International Conference on Pattern Recognition. – Tampa, FL, 2008. – P. 1–4.
13. *Zivkovic Z.* Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2004. – Cambridge, UK, 2004. – Vol. 2. – P. 28–31.
14. *Zivkovic Z. Heijden F. Van Der.* Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background sub-traction // Pattern Recognition Letters. – 2006. – Vol. 27 (7). – P. 773–780.
15. *Walt S. van der, Colbert S.C., Varoquaux G.* The NumPy array: a structure for efficient numerical computation // Computing in Science and Engineering. – 2011. – Vol. 13 (2). – P. 22–30.
16. *Vidanapathirana M.* Real-time human detection in computer vision [Electronic resource]. – URL: <https://medium.com/@madhawavidanapathirana/https-medium-com-madhawavidanapathirana-real-time-human-detection-in-computer-vision-part-1-2acb851f4e55> (accessed: 15.09.2019).
17. *Васильева Т.Н., Мамонова Т.Е.* Применение методов искусственного интеллекта // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2014. – С. 402, 403.
18. *Sukhadeve A.* Understanding neural network [Electronic resource]. – 2017. – URL: <https://www.datasciencecentral.com/profiles/blogs/understanding-neural-network-a-beginner-s-guide> (accessed: 15.09.2019).
19. *Seif E.* What is deep learning? Who are the deep learning teachers? [Electronic resource]. – 2018. – URL: <http://inservice.ascd.org/what-is-deep-learning-who-are-the-deep-learning-teachers/> (accessed: 15.09.2019).
20. Tensorflow Object Detection API [Electronic resource]. – URL: https://github.com/tensorflow/models/tree/master/research/object_detection (accessed: 15.09.2019).
21. Tensorflow detection model zoo [Electronic resource]. – URL: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/detection_model_zoo.md (accessed: 15.09.2019).

Лошаков Константин Павлович, студент направления «Робототехника и мехатроника» Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – компьютерное зрение и машинное обучение. Имеет одну публикацию. E-mail: konstant970406@bk.ru.

Мамонова Татьяна Егоровна, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – моделирование течения жидкости в трубопроводе на основе гидродинамических процессов, искусственный интеллект и его применение, цифровизация процессов и систем, когнитивная визуализация данных, обработка изображений. Имеет 56 публикаций. E-mail: stepte@tpu.ru.

Loshakov Konstantin Pavlovich, student at the Robotics and mechatronics department in TPU. The main research subjects are computer vision and machine learning. He is the author of 1 research paper. E-mail: konstant970406@bk.ru.

Mamonova Tatyana Egorovna, PhD, an associate professor at the TPU automation and robotics department. The main research subjects are fluid flow modeling in a pipeline based on hydrodynamic processes, artificial intelligence and its application, digitalization of processes and systems, cognitive data visualization, and image processing. She is the author of 56 research papers. E-mail: stepte@tpu.ru.

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-77-86

An algorithm of tracking and detection of moving objects in a video stream*K.P. LOSHAKOV^a, T.E. MAMONOVA^b

Tomsk National Research Polytechnic University, 30 Lenina Street, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a kpl2@tpu.ru ^b stepte@tpu.ru**Abstract**

The relevance of the presented work is determined by the need to create automatic security systems in places of crowds of people to detect suspicious human behaviors which are manifested in sudden movements. This is necessary in order to warn of a potential danger and take appropriate measures afterwards. Two programs have been developed for tracking objects (people are used as an example of objects in this article) that change their positions in the frame and place them into framing rectangles. Describes an algorithm for comparing two frames from a video stream and framing in a rectangle of people who have changed their position in the frame. The created algorithm allows processing up to 17 pairs of frames per second, which means the applicability of the algorithm in real-time tasks. It has been established that setting a minimum height of an object is a necessary part of the algorithm in order to exclude the selection of noises as moving objects. A high result is shown in accuracy and time of object selection in real-time tasks using the proposed algorithm.

Keywords: OpenCV, python, detection algorithm, frames comparison, real-time processing, Background Subtraction MOG2, numpy, MaskR-CNN

REFERENCES

1. Prasad P.B. Machine vision systems and image processing with applications. *Journal of Innovation in Computer Science and Engineering*, 2013, vol. 2 (2), pp. 1–4.
2. Luvizon D.C., Nassu B.T., Minetto R. Vehicle speed estimation by license plate detection and tracking [Electronic resource]. *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Florence, Italy, 2014, pp. 6563–6567. Available at: https://www.researchgate.net/publication/262067228_Vehicle_speed_estimation_by_license_plate_detection_and_tracking (accessed 15.09.2019).
3. Shleymovich M.P., Medvedev M.V., Lyasheva S.A., Kirpichnikov A.P. Metody vychitaniya fona v sisteme upravleniya tekhnologicheskimi protsessom [Lantern subtraction methods in the process control system] *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta – Herald of technological university*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/metody-vychitaniya-fona-v-sisteme-upravleniya-tekhnologicheskimi-protsessom> (accessed 15.09.2019).
4. Ke Xia, Zhengxin Weng. Workpieces sorting system based on industrial robot of machine vision. *2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, Shanghai, China, 2016, pp. 422–426.
5. Loshakov K.P. [Development of computer vision system for agriculture technic]. *Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii: sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Youth and Modern Information Technology (YMIT): XVI International Scientific-Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists], Tomsk, 2018, pp. 340–341. (In Russian).
6. Wu H., Luo H., Zhu W., Wang Y., Zhang Q., Ma B., Yang Y., Fan H., Xu H. Surface defect detection of plaster coating based on machine vision. *2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, Beijing, China, 2017, pp. 277–281.
7. Govardhan P., Pati U.C. NIR image based pedestrian detection in night vision with cascade classification and validation. *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*, Ramanathapuram, India, 2014, pp. 1435–1438.

* Received 03 March 2019.

8. Pertsau D., Uvarov A. Face detection algorithm using haar-like feature for GPU architecture. *2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*, Berlin, Germany, 2013, pp. 726–730.
9. Bradsky G., Kaehler A. *Learning OpenCV*. Sebastopol, CA O'Reilly, 2008. ISBN 978-0-596-51613-0.
10. Rezha Aditya Maulana Budiman, Balza Achmad, Faridar, Agus Arif, Nopriadi, Luthfi Zaharif. Localization of white blood cell images using Haar cascade classifiers. *2016 1st International Conference on Biomedical Engineering (IBIOMED)*, Yogyakarta, Indonesia, 2016. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7869822> (accessed 19.09.2019).
11. *The structure of the XML file generated: understanding the XML file*. 2017. Available at: https://knowledge.exlibrisgroup.com/Primo/Product_Documentation/Technical_Guide/050Matching_Records_in_the_Serials_and_Non-Serials_Dedup_Algorithm/030Structure_of_the_XML_File__ (accessed 15.09.2019).
12. Benezeth Y., Jodoin P.M., Emile B., Laurent H., Rosenberger C. Review and evaluation of commonly-implemented background subtraction algorithms. *2008 19th International Conference on Pattern Recognition*, Tampa, FL, 2008, pp. 1–4.
13. Zivkovic Z. Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction. *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2004*, Cambridge, UK, 2004, vol. 2, pp. 28–31.
14. Zivkovic Z. Heijden F. Van Der. Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background subtraction. *Pattern Recognition Letters*, 2006, vol. 27 (7), pp. 773–780.
15. Walt S. van der, Colbert S.C., Varoquaux G. The NumPy array: a structure for efficient numerical computation. *Computing in Science and Engineering*, 2011, vol. 13 (2), pp. 22–30.
16. Vidanapathirana M. *Real-time human detection in computer vision*. Available at: <https://medium.com/@madhawavidanapathirana/https-medium-com-madhawavidanapathirana-real-time-human-detection-in-computer-vision-part-1-2acb851f4e55> (accessed 15.09.2019).
17. Vasil'eva T.N., Mamonova T.E. [Application of artificial intelligence]. *Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii: sbornik trudov XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and Modern Information Technology (YMIT): XII International Scientific-Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists], Tomsk, 2014, pp. 402–403. (In Russian).
18. Sukhadeve A. *Understanding neural network*. 2017. Available at: <https://www.datascience-central.com/profiles/blogs/understanding-neural-network-a-beginner-s-guide> (accessed 15.09.2019).
19. Seif E. *What is deep learning? Who are the deep learning teachers?* 2018. Available at: <http://inservice.ascd.org/what-is-deep-learning-who-are-the-deep-learning-teachers/> (accessed 15.09.2019).
20. *Tensorflow Object Detection API*. Available at: https://github.com/tensorflow/models/tree/master/research/object_detection (accessed 15.09.2019).
21. *Tensorflow detection model zoo*. Available at: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/detection_model_zoo.md (accessed 15.09.2019).

Для цитирования:

Лошаков К.П., Мамонова Т.Е. Алгоритм отслеживания и выделения движущихся объектов в видеопотоке // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 77–86. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-77-86.

For citation:

Loshakov K.P., Mamonova T.E. Algorithm otslezhivaniya i vydeleniya dvizhushchikhsya ob"ektov v videopotoke [An algorithm of tracking and detection of moving objects in a video stream]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 77–86. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-77-86.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 519.7

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-87-96

Применение статистических тестов NIST для анализа выходных последовательностей блочных шифров*

А.А. ПЕРОВ

630099, РФ, г. Новосибирск, ул. Каменская, 56, Новосибирский государственный университет экономики и управления

perov_artem@inbox.ru

Современные итеративные блочные шифры являются одним из наиболее востребованных средств обеспечения защищенного обмена информацией в высокоскоростных сетях передачи данных. Широкое применение данной технологии и развитие вычислительных мощностей порождают целый перечень угроз криптоанализа шифров. Обеспечение криптографической стойкости является в данном случае одним из ключевых аспектов криптографического алгоритма, однако криптографическая стойкость невозможна без обеспечения удовлетворительных статистических свойств, так как ряд атак на блочные шифры основан как раз на статистических уязвимостях выходной последовательности. Дизайнеры используемых на сегодняшний день криптографических алгоритмов установили определенный запас при выборе характеристик работы шифров, тогда как выходная последовательность многих алгоритмов становится неотличима от случайной за меньшее, чем полное, число раундов шифрования. Некоторое сокращение такого параметра блочного шифра, как число раундов, позволит обеспечить удовлетворительные статистические свойства, при этом увеличив скорость работы алгоритма. Для проверки статистических свойств шифра проводится статистический анализ с помощью специализированных тестов, который, как правило, сопряжен с рядом сложностей.

В настоящей статье рассматривается задача анализа выходных последовательностей блочных шифров с целью поиска оптимального (минимального) числа раундов шифрования, при котором шифртекст неотличим от случайного. Изложены основные принципы работы статистических тестов. Описана технология обеспечения взаимодействия реализаций статистических тестов и криптоалгоритмов, которая предложена и реализована автором средствами языков программирования. Продемонстрированы новые, полученные в результате экспериментов характеристики работы для алгоритмов из библиотеки SP800-38A.

Ключевые слова: криптография, итеративные криптоалгоритмы, блочные шифры, легковесные шифры, ключевая последовательность, раунд шифрования, статистические тесты, статистический анализ

* *Статья получена 30 декабря 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Современные итеративные криптосистемы помимо секретного ключа шифрования используют так называемые раундовые ключи. Принимая во внимание основное правило криптографии – принцип Керкгоффа [1], который гласит о том, что за конфиденциальность шифртекста отвечает только ключевая последовательность, можно сделать вывод о том, что задача генерации качественного ключа является одной из важных. Чтобы сделать вывод о работе генератора псевдослучайных чисел, а также оценить степень случайности выходной последовательности криптоалгоритма, необходимо провести тестирование статистических характеристик. Необходимость в генерации качественной псевдослучайной последовательности, а также в соблюдении хороших статистических свойств обусловлена тем, что ни шифртекст, ни ключевая последовательность не должны быть предсказуемы для злоумышленника. Имея информацию о статистических уязвимостях ключа шифрования, криптоаналитик может существенно снизить диапазон перебираемых ключей, что позволит реализовать атаку полным перебором. В ситуации, когда злоумышленник перехватывает зашифрованное сообщение, неудовлетворительные статистические свойства могут послужить причиной атаки по известному шифртексту.

Следует отметить, что задачи, которые решают криптографические алгоритмы, сводятся к получению последовательности из двоичных символов, а не байт. В данном случае качественный генератор можно сравнить с идеально ровной монетой, вероятность выпадения каждой из сторон которой строго равна 0,5. Генераторы случайных чисел можно поделить на два основных типа: истинно случайные физические генераторы/датчики случайных чисел и псевдослучайные программные датчики/генераторы случайных чисел. Первые принимают на вход некий случайный бесконечный процесс, а на выходе дают бесконечную (зависит от времени наблюдения) последовательность 0 и 1. Вторые представляют собой заданную разработчиком детерминированную функцию, которая инициализируется так называемым зерном, после чего также на выходе выдает последовательность 0 и 1. Зная это зерно, можно предсказать всю последовательность. Хороший программный датчик случайных чисел тот, для которого невозможно предсказать последующие значения, имея всю историю предыдущих значений, то есть не имея зерна. Задача восстановления предыдущего члена последовательности, заключающаяся в определении элемента последовательности a_{i-1} по известным k членам последовательности $a_i a_{i+1} a_{i+2} \dots a_{i+k-1}$, называется непредсказуемостью влево. Существует и обратная задача предсказания следующего члена последовательности, при которой по известным k членам последовательности $a_{i-k+1} a_{i-k+2} \dots a_{i-1} a_i$ предсказывается значение a_{i+1} , она называется непредсказуемостью вправо [2].

Использование истинно случайных (физических) датчиков случайных чисел сопряжено с рядом проблем.

- Случайное явление/процесс, которое берется за основу, может быть не способно выдавать числа с нужной скоростью.
- Степень случайности некоторых физических явлений можно поставить под сомнение. Например, электромагнитный шум может быть суперпозицией нескольких более-менее однообразных периодических сигналов.

Ряд статистических тестов разработан NIST [3]. В основе каждого из этих тестов лежит задача вычисления статистики, характеризующей некое

свойство последовательности, после чего эта статистика сравнивается с эталонной статистикой, которую дает идеально случайная последовательность. Эталонная статистика выводится математически, чему посвящено множество теорем и научных трудов по криптографии и теории чисел. Тесты NIST в рамках исследований выходных последовательностей криптографических систем уже применялись в работе [4].

В основе тестов лежит понятие нулевой гипотезы. Нулевая гипотеза – это предположение, что между фактами появления чисел имеется какая-либо взаимосвязь. Иными словами, за нулевую гипотезу принимается предположение, что последовательность является истинно случайной (знаки которой появляются равновероятно и независимо друг от друга). Следовательно, если такая гипотеза верна, то генератор отвечает хорошим статистическим характеристикам.

Проверка гипотезы заключается в том, что имеется статистика, подсчитанная на основе собранных данных (например, по уже сгенерированным ключам). С другой стороны, имеется эталонная статистика, получаемая математическими методами (вычисленная сугубо теоретически), которая бы имела идеально случайную последовательность. Фактическая статистика, конечно, не может сравняться с эталонной: насколько бы ни был хорош генератор, он не может быть идеален. Для этого вводится некоторая доля погрешности (например, 0.05).

Таким образом, существует 4 итоговых результата.

- Сделан вывод о том, что последовательность случайна, и это верный вывод.
- Сделан вывод о том, что последовательность не случайна, хотя она была на самом деле случайна. Такие ошибки называют ошибками первого рода.
- Последовательность признана случайной, хотя на самом деле таковой не является, такие ошибки называют ошибками второго рода.
- Последовательность справедливо отбракована.

В каждом тесте вычисляется так называемое Р-значение: это вероятность того, что генератор произведет последовательность не хуже, чем гипотетический истинный. Если Р-значение = 1, то последовательность идеально случайна, а если она равно нулю, то последовательность полностью предсказуема. В дальнейшем Р-значение сравнивается с α , и если оно больше α , то нулевая гипотеза принимается и последовательность признается случайной, в противном случае отбраковывается.

В тестах берется $\alpha = 0.01$. Из этого следует:

- если Р-значение ≥ 0.01 , то последовательность признается случайной с уровнем доверия 99 %;
- если Р-значение < 0.01 , то последовательность отбраковывается с уровнем доверия 99 %.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для генерации псевдослучайных последовательностей из блочного шифра используется генератор псевдослучайных последовательностей, построенный на базе блочного шифра посредством использования режима шифрования CTR. Режим CTR (counter mode, режим счетчика) предполагает

возврат на вход соответствующего алгоритма блочного шифрования значения некоторого счетчика, накопленного с момента старта, и делает из блочного шифра потоковый, то есть генерирует последовательность, к которой применяется операция XOR с текстом сообщения. Исходный текст и блок зашифрованного текста имеют один и тот же размер блока, как и основной шифр.

Шифрование в режиме CTR можно представить следующей формулой:

$$C_i = P_i \oplus E_k(CTR_i), \quad (1)$$

где C_i – i -й блок шифротекста; P_i – i -й блок открытого текста, $E_k(x)$ – функция шифрования блока x с ключом k ; CTR_i – значение счетчика для i -го блока;

В явном виде CTR_i можно записать так:

$$CTR_i = R[1] \parallel N_i[1] \parallel R[2] \parallel N_i[2] \parallel R[3] \parallel N_i[3] \parallel R[4] \vee N_i[4], \quad (2)$$

где $N_i[j]$ – j -я пара байт числа номера i -го блока; $R[i]$ – i -я пара байт случайного числа R ; \vee – операция конкатенации.

Случайное число R определяется однократно перед началом работы алгоритма. В коде данный алгоритм реализован в функции `generate_ctr`, которая в качестве единственного аргумента принимает указатель на массив из четырех 32-битных чисел, в который будет записано значение счетчика для i -го блока. В данном случае переменная `nonce` – случайное 64-битное число, `counter` – номер блока.

```
u64 nonce = 0x1F3C091AD5B3CFAB;
u64 counter = 0x0000000000000000;
```

```
void generate_ctr(u32* result) {
    u16 nonce16[4];
    u16 counter16[4];
    _64to16(&nonce, nonce16, 1);
    _64to16(&counter, counter16, 1);

    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        u16 temp[2] = {counter16[3 - i], nonce16[3 - i]};
        _16to32(temp, &(result[i]), 1);
    }

    if (counter == UINT64_MAX) {
        counter = 0;
    } else {
        counter++;
    }
}
```

Данная конструкция создана для того, чтобы унифицировать значение для всех шифров, так как у разных алгоритмов размер блока варьируется от 32 до 128 бит. Для эксперимента требуется, чтобы у каждого шифра в блоке была и часть счетчика, и часть случайного числа. Таким образом, для каждого шифра и для разного количества раундов генерируется псевдослучайная последовательность байт заданной длины, которую необходимо подвергнуть тестированию набором статистических тестов NIST.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения тестов были выбраны алгоритмы, представленные в библиотеке SPPCRYPTO. Ранее автором были проделаны эксперименты над шифрами из библиотеки BLOC [5,6], которые проводились тестами «Стопка книг» [7] и «Адаптивный криптерий хи-квадрат» [8] для изучения вопроса борьбы с атакой-различителем. Эта универсальная атака относится ко всем симметричным криптоалгоритмам. Задача шифра преобразовывать информацию так, чтобы зашифрованный текст выглядел как случайный, то есть вероятность появления каждого символа исходного алфавита была одинакова, однако современные шифры являются детерминированными алгоритмами, неспособными генерировать истинно случайные последовательности, поэтому теоретически для любого шифра эту «неслучайность» можно обнаружить. Таким образом, важным требованием к шифру является неотличимость зашифрованного текста от случайной последовательности никакими известными тестами, методами, критериями. Если зашифрованный текст удастся отличить от равномерно распределенных случайных чисел, то это является интересным научным результатом и указывает на недостаток шифра. Более того, подобный недостаток может быть использован для определения секретного ключа [9].

Проведенные ранее исследования показали, что для выходной последовательности урезанных версий алгоритмов возможно обеспечение удовлетворительных статистических свойств, хотя и были проведены только двумя тестами. Для получения новых результатов тестирования шифров [10] были добавлены 15 статистических тестов NIST:

- частотный побитовый тест;
- частотный блочный тест;
- тест на последовательность одинаковых битов;
- тест на самую длинную последовательность единиц в блоке;
- тест рангов бинарных матриц;
- спектральный тест;
- тест на совпадение неперекрывающихся шаблонов;
- тест на совпадение перекрывающихся шаблонов;
- универсальный статистический тест Маурера;
- тест на линейную сложность;
- тест на периодичность;
- тест приближительной энтропии;
- тест кумулятивных сумм;
- тест на произвольные отклонения;
- другой тест на произвольные отклонения.

В рамках существующей реализации тесты NIST работают на базе библиотеки GSL (GNU Scientific Library), которая написана на языке C и содержит значительное количество функций – от элементарных математических операций и операций с комплексными числами до численных методов дифференцирования, интерполяции, аппроксимации, решения дифференциальных уравнений, wavelet-преобразования и многих других. За счет широкого спектра математических функций объект исследования подвергается тщательному всестороннему анализу.

На вход алгоритму в качестве открытого текста подавался поток нулей длиной 2^{27} бит. Для работы интегрированных тестов статистических тестов были сгенерированы бинарные файлы с выходными последовательностями криптосистем в формате <имя шифра>_<количество раундов>_ciphertext.bin, тем самым создав структуру каталогов.

Корректное взаимодействие шифров и тестов обеспечил дополнительный скрипт, написанный на языке Python, задачей которого было рекурсивным способом обойти каталоги с шифртекстами и сформировать отчет о тестировании, запуская исполняемый файл тестов и подавая на вход сгенерированные файлы с выходными последовательностями. Ниже приводится фрагмент программного кода скрипта:

```

    For filepath in result: reports_folder =
filepath.parent.joinpath('reports')
        if not reports_folder.exists():
            reports_folder.mkdir()

            input_file = str(filepath)
            output_file = re-
ports_folder.joinpath(filepath.name.replace('.bin', '.txt'))

            args = ("./statisticaltests", input_file,
output_file) # запускаем тесты, указываем файл с
            p = subprocess.Popen(args, stdout=subprocess.PIPE)
            p.wait()

```

После прохождения тестов генерируется выходной файл с отчетом, отличающийся от исходного шифртекста расширением .txt. В файл отчета записываются полные данные о прошедшем тесте. Например, для шифра ktantan64 с тремя раундами фрагмент отчета выглядит следующим образом:

```

Frequency test FAILURE
Nb. of ones: 636280
Nb. of zeros: 363720
P-value: 0
Block frequency test FAILURE
Nb. of blocks: 50
Block length: 20000
Nb. of discarded bits: 0
P-value: 0

```

В данный отчет собираются все значения проведенных над шифртекстом тестов. Для однозначной трактовки результатов теста также формируются короткие отчеты с помощью вышеописанного скрипта, фрагмент которого приводится ниже.

```

result_types = ('SUCCESS', 'FAIL')
short_report_file = reports_folder.joinpath(filepath.name.replace('.bin', '_short.txt'))
with output_file.open('r') as report, short_report_file.open('w') as short_report:
    for line in report.readlines():
        line = str(line)
        if any(substr in line for substr in result_types):
            short_report.write(line)

```

Как видно из вышеприведенного кода, формирование отчета происходит посредством поиска результата success или failed и переносит в файл с коротким отчетом информацию о выполненном тестировании.

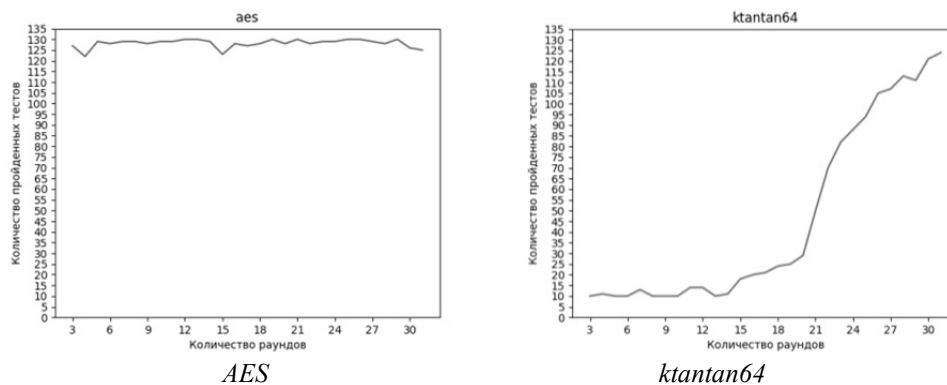
3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с критерием Пирсона вычислим значение хи-квадрат по формуле

$$x^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(v_i - np_i)^2}{np_i},$$

где v – успешно пройденные тестирования, а $np = 150$ (15 тестов проводятся на 10 разных ключах шифрования). Экспериментально найдем, что при $v_i = 126$ значение $\chi^2 = 3.841$, что соответствует уровню значимости $\alpha = 0.05$. Из этого следует, что при 126 пройденных тестах вероятность корректного определения случайности выходной последовательности шифра равна 95 % [11].

Для иллюстрации результатов тестирования разработанный скрипт создает графики зависимости проведенных тестов от количества раундов, на которых тесты были пройдены. Алгоритмы продемонстрировали разные результаты (рисунок).



Графики зависимостей количества пройденных тестов от числа раундов шифрования для алгоритмов AES и ktantan64

Graphs of the dependencies of the number of tests conducted on the number of encryption rounds for the AES and ktantan64 algorithms

Результаты экспериментов доказали возможность использования усеченных характеристик алгоритмов для соблюдения абсолютной случайности выходной последовательности.

В таблице приведены значения раундов для протестированных алгоритмов библиотеки SPPCRYPTO.

Результаты тестирований (Rounds – полное число раундов шифра, R_{\min} – найденное значение усеченного числа раундов, % R – процентное соотношение усеченного числа раундов к полному)

Test results (Rounds are the total number of rounds of the cipher, R_{\min} is the found value of the truncated number of rounds, % R is the percentage of the truncated number of rounds to the full)

Шифр	Rounds	R_{\min}	% R
Anubis	12	3	25
Aria	12	3	25
Cast6	48	3	6
Кузнечик	10	5	50
Mars	32	4	12
SM4	32	9	28
Threefish	72	3	4
Twofish	16	3	19

Полученные результаты свидетельствуют о частичной сопоставляемости с прошлыми исследованиями. В качестве участников эксперимента тестами NIST взяты прошедшие опытную проверку шифры-участники криптографических конкурсов, некоторые из них обеспечивают удовлетворительные статистические свойства уже на первых раундах шифрования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в настоящей работе схема тестирования алгоритмов и разработанная для этого ее программная реализация позволяют сделать процесс тестирования итеративных криптоалгоритмов системным и вариативным, а также несколько упрощает интеграцию новых шифров. Эксперименты над каждым шифром проводились на возрастающем числе раундов с помощью всех предложенных тестов NIST. Подтверждена выдвинутая гипотеза об обеспечении удовлетворительных статистических свойств алгоритмов из библиотеки SP800-38A за меньшее, чем полное, число раундов. Рассмотренные в настоящей работе алгоритмы показали высокие результаты уже на стартовых раундах шифрования.

В будущих работах планируется подробно описать порядок интеграции новых шифров в разработанную систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рябко Б.Я., Фионов А.Н.* Основы современной криптографии и стеганографии. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 232 с.
2. *Слеповичев И.И.* Генераторы псевдослучайных чисел: учебное пособие. – Саратов: СГУ, 2017. – 118 с.
3. A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications / A. Rukhin [et al.]. – Gaithersburg, MD: U.S. Dept. of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2000. – 152 p. – (NIST special publication; 800-22).
4. *Ryabko B., Monarev V.* Using information theory approach to randomness testing // Journal of Statistical Planning and Inference. – 2005. – Vol. 133, N 1. – P. 95–110.
5. *Cazorla M., Marquet K., Minier M.* Survey and benchmark of lightweight block ciphers for wireless sensor networks // IACR Cryptology ePrint Archive. – Report 2013/295.
6. *Cazorla M., Marquet K., Minier M.* Survey and benchmark of lightweight block ciphers for wireless sensor networks // Proceedings of the 10th International Conference on Security and Cryptography, SECURE 2013, Reykjavik, Iceland, 29–31 July, 2013. – Reykjavik, 2013. – P. 543–548.

7. Рябко Б.Я., Пестунов А.И. «Стопка книг» как новый статистический тест для случайных чисел // Проблемы передачи информации. – 2004. – Т. 40, вып. 1. – С. 73–78.
8. Рябко Б.Я., Стогниенко В.С., Шокин Ю.И. Адаптивный критерий χ^2 для различения близких гипотез при большом числе классов и его применение к некоторым задачам криптографии // Проблемы передачи информации. – 2003. – Т. 39, вып. 2. – С. 53–62.
9. Пестунов А.И., Перов А.А., Пестунова Т.М. О некоторых направлениях научных исследований в области криптоанализа симметричных алгоритмов // Вестник НГУЭУ. – 2016. – № 3. – С. 280–298.
10. Перов А.А., Пестунов А.И. Статистическое тестирование современных итеративных блочных шифров с помощью программной библиотеки «УНИБЛОКС-2015» // Инновации в жизнь. – 2016. – № 2. – С. 89–97.
11. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Введение в математическую статистику: учебник. – М.: ЛКИ, 2010. – 600 с.

Перов Артём Андреевич, старший преподаватель кафедры информационных технологий Новосибирского государственного университета экономики и управления. Основное направление научных исследований – криптография. Имеет 14 публикаций. E-mail: perov_artem@inbox.ru

Perov Artem, a senior lecturer at the Novosibirsk State University of Economics and Management. The main research subject is cryptography. He is the author of 14 research papers. E-mail: perov_artem@inbox.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-87-96

Using NIST statistical tests for the analysis of the output sequences of block ciphers*

A.A. PEROV

Novosibirsk, State University of Economics and Management, 56 Kamenskaya Street, Novosibirsk, 630099, Russian Federation

perov_artem@inbox.ru

Abstract

Modern iterative block ciphers are one of the most popular methods for providing a secure information exchange in internet networks. A widespread use of this technology and the development of computing power give rise to a whole list of threats to cryptanalysis of ciphers. Ensuring cryptographic security is in this case one of the key aspects of the cryptographic algorithm, but cryptographic security is impossible without providing satisfactory statistical properties since a number of attacks on block ciphers are based on statistical vulnerabilities of the output sequence. The designers of the cryptographic algorithms used today have established a certain margin when choosing the characteristics of the cipher, while the output sequence of many algorithms becomes indistinguishable from the random sequence for less than the total number of encryption rounds. Some reduction of such a parameter of the block cipher as the number of rounds will provide satisfactory statistical properties while increasing the speed of the algorithm. To check the statistical properties of the cipher statistical analysis is carried out using specialized tests, which, as a rule, involve a number of difficulties.

This article describes the task of analyzing the output of block cipher sequences in order to find the optimal (minimum) number of encryption rounds, in which the cipher text is indistinguishable from the random one. The basic principles of the statistical tests are also described.

* Received 30 December 2018.

The technology of ensuring the interaction of implementations of statistical tests and cryptographic algorithms, which is proposed and implemented by the author by means of programming languages, is described. New, obtained as a result of experiments characteristics of work for algorithms from the CPPCRYPTO library are demonstrated.

Keywords: cryptography, iterative cryptographic algorithms, block ciphers, lightweight ciphers, key, encryption round, statistical tests, statistical analysis

REFERENCES

1. Ryabko B.Ya., Fionov A.N. *Osnovy sovremennoi kriptografii i steganografii* [Fundamentals of modern cryptography and steganography]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2010. 232 p.
2. Slepovichev I.I. *Generatory psevdosluchainykh chisel* [Pseudo random number generators]. Saratov, SGU Publ., 2017. 118 p.
3. Rukhin A.L. *A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications*. Gaithersburg, MD, U.S. Dept. of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2000. 152 p. *NIST special publication*, 800-22.
4. Ryabko B., Monarev V. Using information theory approach to randomness testing. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2005, vol. 133, no. 1, pp. 95–110.
5. Cazorla M., Marquet K., Minier M. Survey and benchmark of lightweight block ciphers for wireless sensor networks. *IACR Cryptology ePrint Archive*. Report 2013/295.
6. Cazorla M., Marquet K., Minier M. Survey and benchmark of lightweight block ciphers for wireless sensor networks. *Proceedings of the 10th International Conference on Security and Cryptography, SECRYPT 2013*, Reykjavik, Iceland, 29–31 July, 2013, pp. 543–548.
7. Ryabko B.Ya., Pestunov A.I. "Stopka knig" kak novyi statisticheskii test dlya sluchainykh chisel ["Book Stack" as a new statistical test for random numbers]. *Problemy peredachi informatsii – Problems of Information Transmission*, 2004, vol. 40, iss. 1, pp. 73–78.
8. Ryabko B.Ya., Stognienko V.S., Shokin Yu.I. Adaptivnyi kriterii χ^2 dlya razlicheniya blizkikh gipotez pri bol'shom chisle klassov i ego primenenie k nekotorym zadacham kriptografii [Adaptive χ^2 test for discriminating between close hypotheses with a large number of classes and its application to some cryptography problems]. *Problemy peredachi informatsii – Problems of Information Transmission*, 2003, vol. 39, iss. 2, pp. 53–62.
9. Pestunov A.I., Perov A.A., Pestunova T.M. O nekotorykh napravleniyakh nauchnykh issledovaniy v oblasti kriptanaliza simmetrichnykh algoritmov [On some scientific problems in cryptanalysis of symmetric algorithms]. *Vestnik NGUEU – Vestnik NSUEM*, 2016, no. 3, pp. 280–298.
10. Perov A.A., Pestunov A.I. Statisticheskoe testirovanie sovremennykh iterativnykh blochnykh shifrov s pomoshch'yu programmnoi biblioteki "UNIBLOKS-2015" [Statistical testing of modern iterative block codes by means of program library "UNIBLOKS-2015"]. *Innovatsii v zhizni' – Innovations in Life*, 2016, no. 2, pp. 89–97.
11. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Vvedenie v matematicheskuyu statistiku* [Introduction to mathematical statistics]. Moscow, LKI Publ., 2010. 600 p.

Для цитирования:

Перов А.А. Применение статистических тестов NIST для анализа выходных последовательностей блочных шифров // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 87–96. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-87-96.

For citation:

Perov A.A. Primenenie statisticheskikh testov NIST dlya analiza vykhodnykh posledovatel'nostei blochnykh shifrov [Using NIST statistical tests for the analysis of the output sequences of block ciphers]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 87–96. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-87-96.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENTATION,
METROLOGY
AND INFORMATION AND
MEASURING DEVICES
AND SYSTEMS

УДК 621.793.79

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-97-114

Исследование влияния толщины слоя жидкости на частотные характеристики колебательной системы*

В.Н. ХМЕЛЕВ^a, А.В. ШАЛУНОВ^b, Д.В. ГЕННЕ^c, Р.В. БАРСУКОВ^d, В.А. НЕСТЕРОВ^e

659305, РФ, г. Бийск, ул. Трофимова, 27, Бийский технологический институт
(филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова

^a vnh@bti.secna.ru ^b shalunov@bti.secna.ru ^c gdv@bti.secna.ru
^d roman@bti.secna.ru ^e nva@bti.secna.ru

Ультразвуковое распыление жидкостей позволяет получать аэрозоли с высокими потребительскими характеристиками. По этой причине ультразвуковое распылительное оборудование находит применение во многих областях науки (создание новых веществ, распылительная сушка), медицины (напыление антикоагулянта в пробирки для забора крови, напыление препаратов на коронарные стенты) и техники (напыление фоторезиста при производстве полупроводников, напыление различных чувствительных и защитных покрытий).

Известно, что любое воздействие на рабочий инструмент ультразвуковой колебательной системы приводит к изменению ее характеристик (в частности, к изменению резонансной частоты). Контролируя изменения характеристик ультразвуковых распылительных систем, можно определить объем распыляемой жидкости (присоединенной массы) на поверхности рабочего окончания. Кроме резонансной частоты, «присоединенная масса» оказывает влияние на другие характеристики распылительной ультразвуковой колебательной системы, такие как фазочастотная характеристика, сопротивление на частоте резонанса и «антирезонанса». Всё это позволяет не только определять толщину распыляемого слоя, но и дает возможность определения свойств самой распыляемой жидкости, т. е. своеобразная идентификация жидкости. Получение и обработка подобной информации позволит в будущем автоматически производить тестирование распыляемой жидкости с последующим автоматическим выбором оптимального режима.

В связи с этим актуальным является разработка методов косвенного контроля свойств распыляемых веществ, создание алгоритмов и методик, позволяющих автоматизировать процесс контроля ультразвукового распыления. Статья посвящена разработке научных основ автоматизации процесса ультразвукового распыления за счет разработки косвенного контроля толщины (массы) слоя распыляемой жидкости на рабочей поверхности ультразвуковой колебательной системы.

* Статья получена 22 декабря 2018 г.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00121).

Ключевые слова: оптимальный слой, ультразвуковое распыление, аэрозоль, капиллярные волны, изменение резонансной частоты, средняя толщина слоя распыляемой жидкости, присоединенная масса, рабочий инструмент

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковое распыление находит применение в различных областях науки и отраслях производства. При распылении жидкости под действием механических колебаний переход в аэрозольное состояние происходит из-за увеличения поверхностной энергии пленки жидкости.

Ультразвуковое распыление жидкости обладает рядом преимуществ [1–3] по сравнению с традиционными способами, например:

- малая энергоемкость процесса распыления;
- относительно высокая производительность;
- возможность высокодисперсного распыления жидкости;
- получение монодисперсных аэрозолей;
- способность получать аэрозоли из высоковязких жидкостей без предварительного их разведения.

Все вышеперечисленные достоинства позволили ультразвуковому распылению занять прочную позицию в медицине, химической, радиоэлектронной и других отраслях промышленности [4].

1. СПОСОБЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В аэрозольное состояние под действием ультразвуковых колебаний жидкость переходит на границе раздела газовой и жидкой сред. Акустическая энергия может быть подведена к зоне распыления как со стороны жидкости, так и со стороны газа. Известны несколько способов подвода акустической энергии к распыляемой жидкости.

1. Распыление жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через газ.

2. Распыление жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через жидкость также реализуется двумя способами:

а) распыление жидкости в фонтане (высокочастотное ультразвуковое распыление) [5, 6];

б) распыление жидкости в слое (низкочастотное УЗ распыление).

В работе рассматривается только акустическое распыление в слое с подводом энергии через жидкость.

Процесс образования аэрозоля схематично представлен на рис. 1. Волны образуются на поверхности слоя жидкости, покрывающей колеблющуюся поверхность [7]. С увеличением амплитуды колебаний поверхности амплитуда волн увеличивается, достигая предельной величины, при которой происходит отделение от них капель жидкости. Экспериментально установлено, что для образования капиллярных волн толщина пленки жидкости должна находиться в определенных пределах, зависящих от частоты колебаний и свойств распыляемой жидкости. В общем случае толщина слоя жидкости, покрывающего колеблющуюся поверхность, является конечной величиной

и не может выходить за рамки интервала, при котором распыление прекращается [7]:

$$0 < h < (\lambda/2). \quad (1)$$

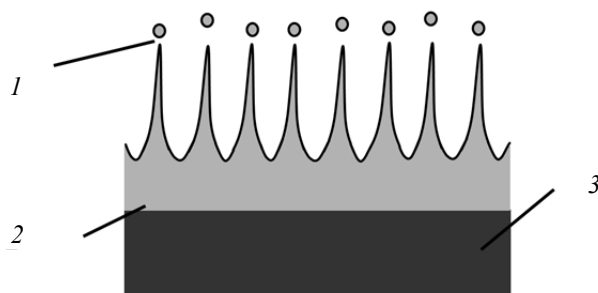


Рис. 1. Механизм образования аэрозоля под действием УЗ колебаний:

1 – капли аэрозоля; 2 – слой жидкости и капиллярные волны; 3 – поверхность преобразователя

Fig. 1. The mechanism of aerosol formation under the action of ultrasonic vibrations:

1 is aerosol droplets, 2 is a liquid layer and capillary waves, 3 is a transducer surface

При реализации ультразвукового распыления в слое жидкости возникают стоячие капиллярные волны. Внутри интервала (1) существует экстремальная зависимость производительности распыления от толщины слоя [8–10]. Например, распыление воды акустическими колебаниями с частотой 20 кГц происходит только в том случае, если толщина слоя распыляемой жидкости составляет от 0,4 до 3,2 мм, причем максимум производительности соответствует толщине $h \approx 0,8$ мм.

Из вышесказанного следует сделать вывод о том, что толщина слоя жидкости на колеблющейся поверхности является одним из ключевых факторов, влияющих на производительность процесса распыления.

Соответственно, актуальной задачей является контроль толщины слоя жидкости в процессе распыления для управления процессом и поддержания оптимального значения.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Поскольку непосредственный инструментальный контроль толщины слоя в процессе распыления невозможен, возникает необходимость поиска такого метода контроля толщины слоя.

Слой жидкости на колеблющейся поверхности с акустической точки зрения является дополнительной (присоединенной) массой [11] и влияет на свойства всей колебательной системы в целом. Как показано в работах [12, 13], колебательная система в процессе воздействия может выступать в роли датчика. Существуют методы [14, 15], позволяющие оценивать это влияние. Согласно теории электромеханических аналогий, пьезопреобразователь вблизи

своей резонансной частоты можно представить в виде эквивалентной схемы на рис. 2 [16–18].

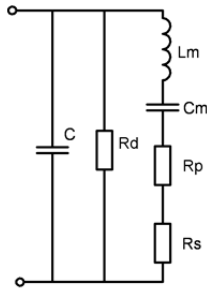


Рис. 2. Электрическая эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя:

L_m – эквивалентна колеблющейся массе системы, C_m – гибкость, R_p – сопротивление механических потерь, R_s – сопротивление излучения колебательной системы, C – электрическая (статическая) емкость преобразователя, R_d – диэлектрические потери в пьезоматериале

Fig. 2. An equivalent electric circuit of a piezoelectric transducer:

L_m is an equivalent to the oscillating mass of the system, C_m is flexibility, R_p is the resistance of mechanical losses, R_s is the resistance of the radiation of the oscillatory system, C is the electric (static) capacitance of the converter, R_d is a dielectric loss in the piezoelectric material

Из эквивалентной схемы следует, что резонансная частота преобразователя определяется последовательным колебательным контуром $L_m C_m$. Как было сказано выше, слой жидкости на поверхности преобразователя является присоединенной массой и, следовательно, влияет на элемент L_m . Из этого следует, что наличие слоя жидкости будет влиять на резонансную частоту УЗКС.

В состав эквивалентной схемы входит статическая емкость преобразователя, определяемая конструкцией и материалом пьезопреобразователя. Эта емкость также влияет на резонансную частоту УЗКС.

3. СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований была использована полуволновая [19, 20] пьезоэлектрическая колебательная система, эскиз и основные резонансные размеры которой приведены на рис. 3.

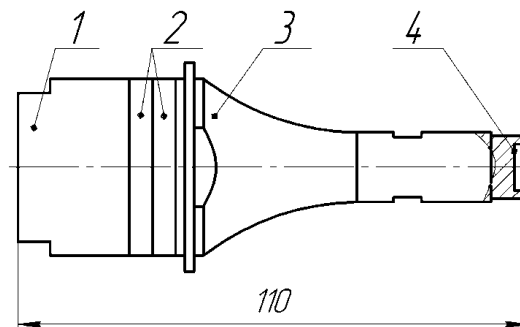


Рис. 3. Эскиз ультразвуковой колебательной системы:

1 – отражающая накладка, 2 – пьезоэлемент, 3 – концентрирующее звено, 4 – рабочий инструмент

Fig. 3. A drawing of an ultrasonic oscillatory system:

1 is a reflecting plate, 2 is a piezoelectric element, 3 is a concentrating element, 4 is a working tool

Резонансная частота колебательной системы равна 22 кГц. Рабочий торец концентрирующего звена 3 колебательной системы снабжен сменными рабочими инструментами 4, присоединяемыми при помощи резьбового соединения. На излучающем торце рабочего инструмента выполнено цилиндрическое углубление, на дне которого формировался слой жидкости, толщину и массу которого предстояло измерять. Эскизы использованных рабочих инструментов с основными размерами приведены на рис. 4. Размеры цилиндрического углубления инструментов представлены в табл. 1.

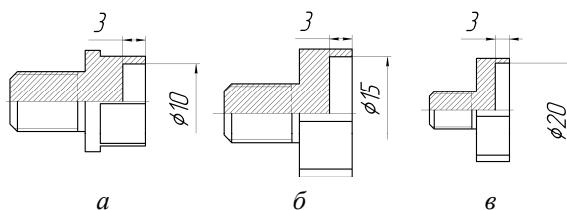


Рис. 4. Чертежи рабочих инструментов:

a – инструмент 1, *б* – инструмент 2, *в* – инструмент 3

Fig. 4. Drawings of working tools:

a is tool 1, *b* is tool 2, *c* is tool 3

Таблица 1

Table 1

Размеры рабочих инструментов

Dimensions of working tools

Номер инструмента	Диаметр внутренней полости, мм	Максимальный объем внутренней полости, см ³
1	10	0,3
2	15	0,45
3	20	0,6

В качестве модельных жидкостей при проведении экспериментов использовались спирт, вода и глицерин, основные физические свойства которых приведены в табл. 2. Выбор жидкостей обусловлен необходимостью исследования максимально широкого диапазона жидкостей по вязкости.

Таблица 2

Table 2

Свойства модельных жидкостей

Properties of model fluids

№	Название	Плотность, г/см ³	Вязкость при 20 °С
1	Спирт	0,7893	1,2
2	Вода	1	1
3	Глицерин	1,261	1412

Для получения частотных характеристик УЗКС в экспериментах использовался измерительный прибор, описанный в работе [21]. Работа измерителя заключается в подаче на исследуемую колебательную систему переменного напряжения в заданном диапазоне частот, и по потребляемому току и напряжению питания УЗКС рассчитываются и строятся частотные характеристики исследуемой колебательной системы. Используемое при проведении экспериментальных исследований оборудование позволяло получать следующие характеристики колебательных систем: амплитудно-частотная характеристика потребляемого тока, фазочастотная характеристика, а также зависимости активного, реактивного и полного импеданса преобразователя колебательной системы от частоты.

Алгоритм проведения экспериментальных исследований включал в себя следующие этапы.

1. Измерение частотных характеристик УЗКС с пустым (сухим) рабочим окончанием.
2. Добавление (в углубление на рабочем инструменте) жидкостей в объеме (0,05 мл или 0,1 мл в зависимости от рабочего инструмента).
3. Измерение частотных характеристик УЗКС.
4. Добавление порции модельных жидкостей в углубления рабочих инструментов.
5. Действия по пунктам 2–4 повторяются до заполнения цилиндрического углубления рабочего инструмента модельной жидкостью.

Для реализации представленной последовательности действий был собран экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 5.

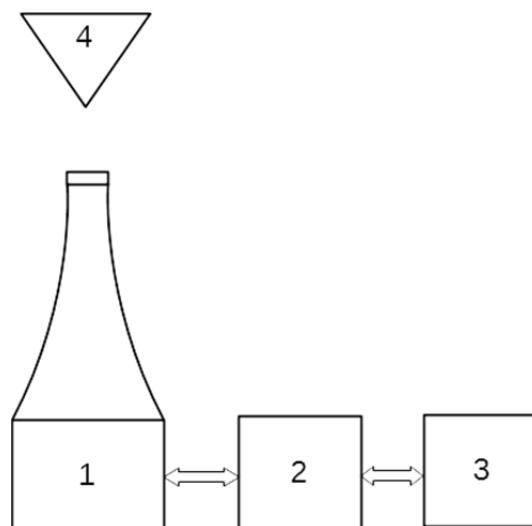


Рис. 5. Структурная схема измерительного стенда:

1 – УЗКС, 2 – измерительный модуль, 3 – ПК,
4 – дозатор

Fig. 5. Block diagram of the measuring stand:

1 is an ultrasonic vibrating system, 2 is a measuring module,
3 is a PC, 4 is a dispenser

Стенд, показанный на рис. 5, состоит из УЗКС, укомплектованной набором рабочих инструментов (табл. 1), измерительного прибора для снятия частотных характеристик и дозатора.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате проведенных экспериментов по описанному выше алгоритму были получены частотные характеристики УЗКС в зависимости от толщины слоя (объема) для модельных жидкостей.

На рис. 6–8 представлены результаты эксперимента для инструмента 1.

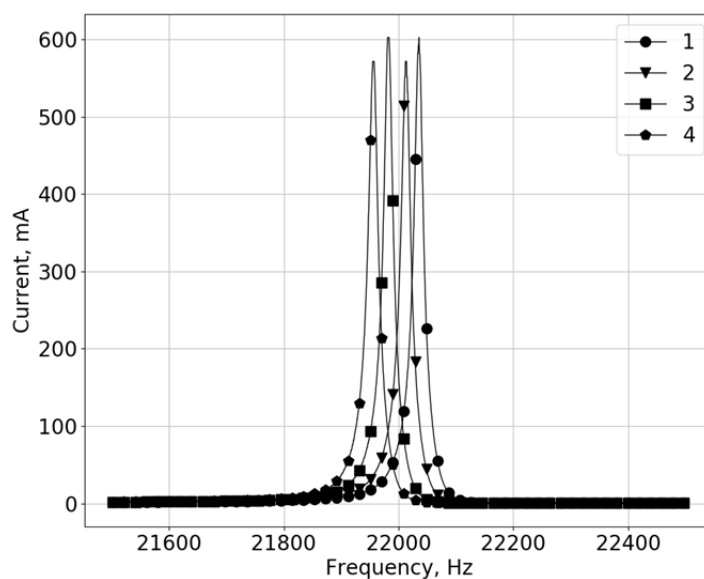


Рис. 6. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:
1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл воды, 3 – объем 0,1 мл воды,
4 – объем 0,15 мл воды

Fig. 6. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of water, 3 is 0.1 ml of water,
4 is 0.15 ml of water

На рис. 6–8 представлена зависимость частотных характеристик УЗКС с инструментом 1 от объема модельных жидкостей. Из анализа зависимостей, представленных на рис. 4–7, можно сделать заключение о существенном влиянии изменения объема модельной жидкости на положение резонанса УЗКС. Прослеживается зависимость между изменением частоты на единицу объема и плотностью модельной жидкости, что подтверждает теоретическое заключение о влиянии присоединенной массы на положение резонанса колебательной системы.

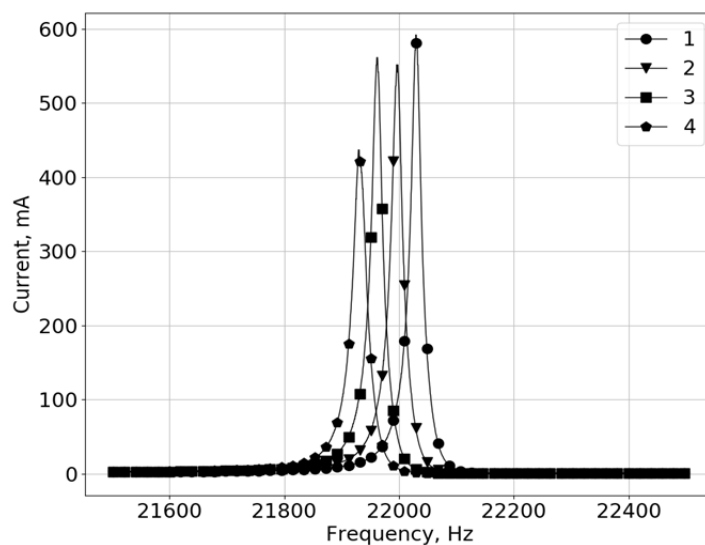


Рис. 7. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл глицерина, 3 – объем 0,1 мл глицерина, 4 – объем 0,15 мл глицерина

Fig. 7. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of glycerin, 3 is 0.1 ml of glycerin, 4 is 0.15 ml of glycerin

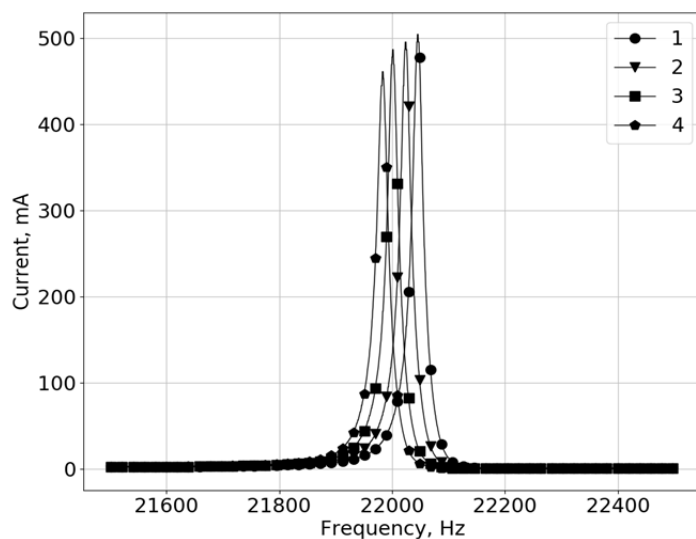


Рис. 8. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл спирта, 3 – объем 0,1 мл спирта, 4 – объем 0,15 мл спирта

Fig. 8. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of alcohol, 3 is 0.1 ml of alcohol, 4 is 0.15 ml of alcohol

На рис. 9–11 представлены результаты экспериментов для инструмента 2 на разных модельных жидкостях.

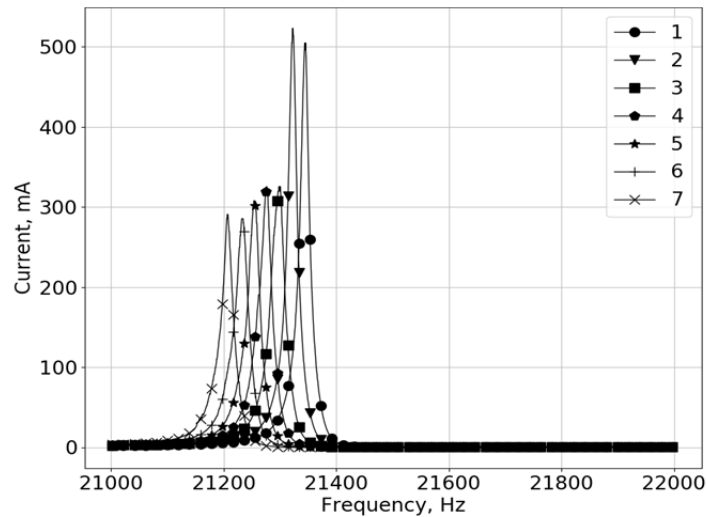


Рис. 9. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл воды, 3 – объем 0,1 мл воды, 4 – объем 0,15 мл воды, 5 – объем 0,2 мл воды, 6 – объем 0,25 мл воды, 7 – объем 0,3 мл воды

Fig. 9. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of water, 3 is 0.1 ml of water, 4 is 0.15 ml of water, 5 is 0.2 ml of water, 6 is 0.25 ml of water, 7 is 0.3 ml of water

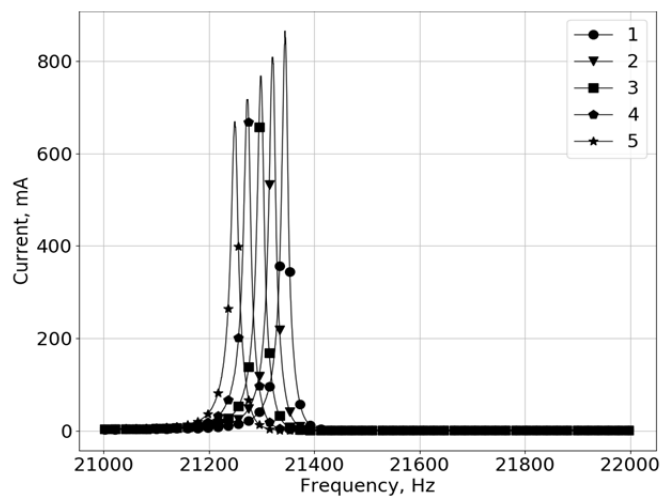


Рис. 10. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл глицерина, 3 – объем 0,1 мл глицерина, 4 – объем 0,15 мл глицерина, 5 – объем 0,2 мл глицерина

Fig. 10. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of glycerin, 3 is 0.1 ml of glycerin, 4 is 0.15 ml of glycerin, 5 is 0.2 ml of glycerin

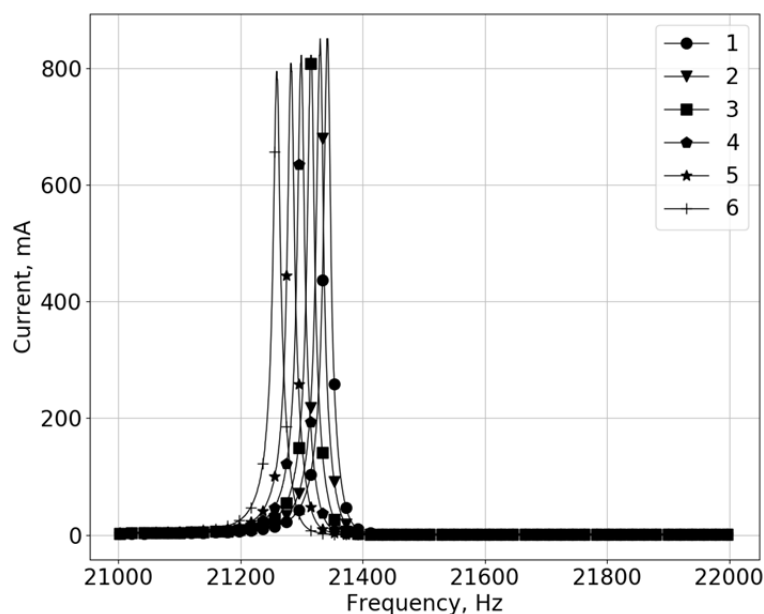


Рис. 11. Зависимость тока, потребляемого УЗКС, от частоты:

1 – пустой инструмент, 2 – объем 0,05 мл спирта, 3 – объем 0,1 мл спирта, 4 – объем 0,15 мл спирта, 5 – объем 0,2 мл спирта, 6 – объем 0,25 мл спирта

Fig. 11. Dependence of current consumed by the ultrasonic vibrating system on frequency:

1 is an empty instrument, 2 is 0.05 ml of alcohol, 3 is 0.1 ml of alcohol, 4 is 0.15 ml of alcohol, 5 is 0.2 ml of alcohol, 6 is 0.25 ml of alcohol

Зависимости, представленные на рис. 9–11, подтверждают справедливость заключения о влиянии присоединенной массы на резонансную частоту УЗКС вне зависимости от размеров рабочего инструмента. Следовательно, изменение резонансной частоты может быть использовано для оценки массы жидкости на рабочей поверхности распылительного инструмента.

5. ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ УЗКС ОТ ОБЪЕМА РАСПЫЛЯЕМОГО МАТЕРИАЛА

Как было показано на эквивалентной схеме замещения рис. 2, у преобразователя присутствует статическая емкость, образованная обкладками пьезоэлементов и пьезоматериалом. Ввиду низкой температурной стабильности диэлектрических свойств пьезоматериала имеется значительная зависимость статической емкости от температуры пьезопреобразователя, что, в свою очередь, влияет на положение резонанса УЗКС в целом.

Для исключения влияния температуры УЗКС было принято решение использовать изменение резонансной частоты относительно частоты сухой (без жидкости) УЗКС, полученное непосредственно перед проведением экспериментов. На рис. 12–14 представлены зависимости изменения резонансной частоты от массы модельной жидкости.

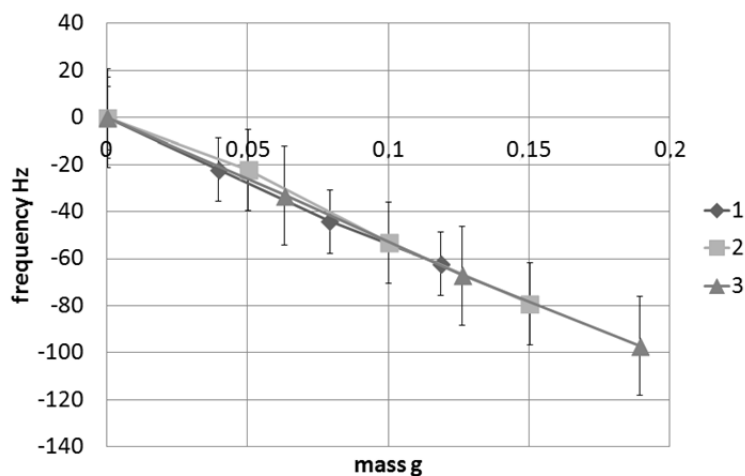


Рис. 12. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 1 от массы модельной жидкости при работе на основной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 12. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 1 based on the mass of the model fluid when operating at the main resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

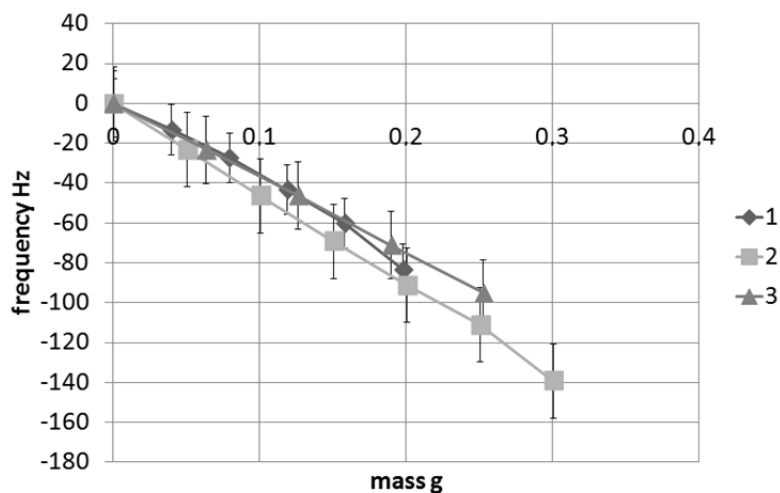


Рис. 13. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 2 от массы модельной жидкости при работе на основной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 13. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 2 based on the mass of the model fluid when operating at the main resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

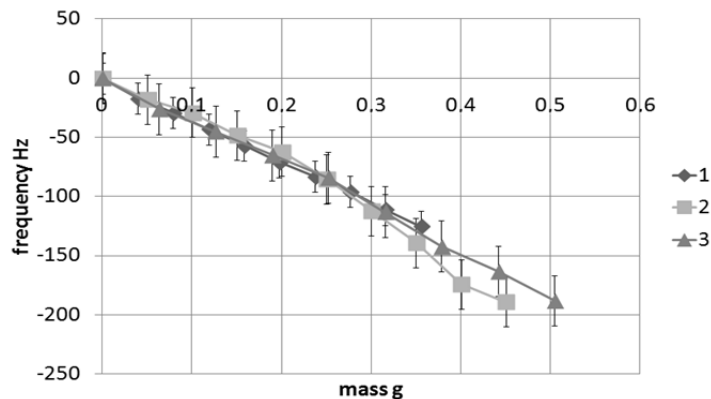


Рис. 14. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 3 от массы модельной жидкости при работе на основной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 14. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 3 based on the mass of the model fluid when operating at the main resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

Проведенные эксперименты подтвердили наличие зависимости изменения резонансной частоты от массы распыляемого материала.

Из зависимостей на рис. 12–14 следует, что изменение частоты мало зависит от свойств самой жидкости. Также полученные зависимости свидетельствуют о близкой к линейной зависимости резонансной частоты от массы жидкости.

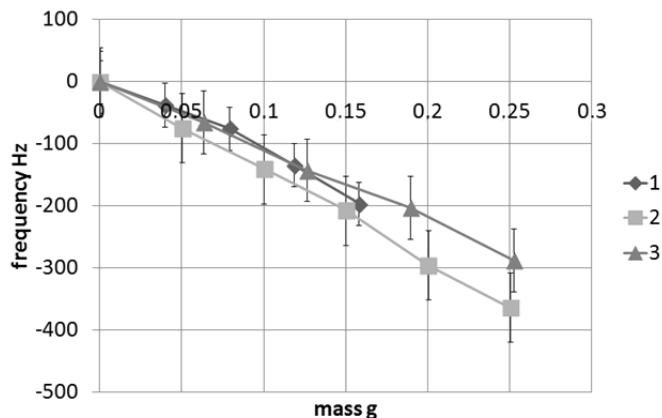


Рис. 15. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 1 от массы модельной жидкости при работе на удвоенной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 15. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 1 based on the mass of the model fluid when operating at a double resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

Исходя из анализа электрической эквивалентной схемы рис. 2 можно сделать заключение, что при работе УЗКС на второй моде (удвоенной частоте) влияние присоединенной массы должно увеличиться. Для проверки этих предположений были проведены исследования на удвоенной частоте УЗКС. На рис. 15 и 16 представлены зависимости при работе УЗКС на частоте 44 кГц.

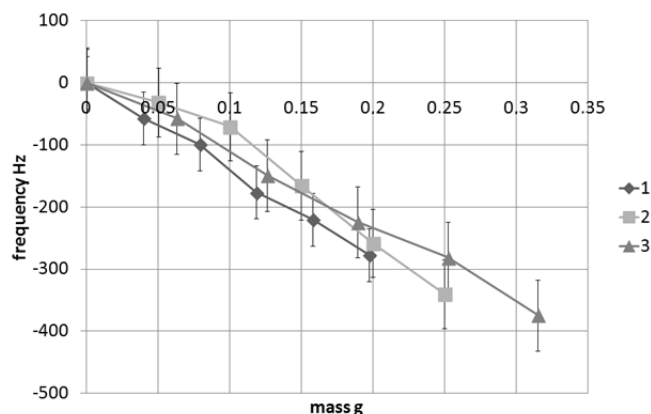


Рис. 16. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 2 от массы модельной жидкости при работе на удвоенной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 16. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 2 based on the mass of the model fluid when operating at a doubled resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

Как можно видеть из сравнения изменений в частотных диапазонах 22 и 44 кГц, во втором случае зависимость изменения частоты от массы жидкости усилилась. Это может позволить повысить точность измерения, переводя УЗКС в режим работы на удвоенной частоте. К сожалению, запуск на удвоенной частоте не всегда возможен, при этом падает эффективность УЗКС. В представленном эксперименте не удалось получить устойчивую работу УЗКС на удвоенной частоте с самым тяжелым инструментом (диаметром 20 мм), это может быть связано с недостаточной мощностью генератора измерительного модуля.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения исследований были получены зависимости изменения частоты УЗКС от массы жидкости (рис. 12–16), вместе с тем практическую значимость для систем распыления представляет именно толщина слоя жидкости на поверхности распылительного инструмента.

На рис. 17 представлены графики зависимости изменения резонансной частоты УЗКС с инструментом 1 от объема жидкости на поверхности инструмента.

Из графиков рис. 18 следует, что зависимость изменения частоты от объема для разных жидкостей сильно отличается. Вместе с тем эти зависимости остаются близкими к линейным. Всё это косвенно подтверждает отсутствие зависимости от свойств жидкости.

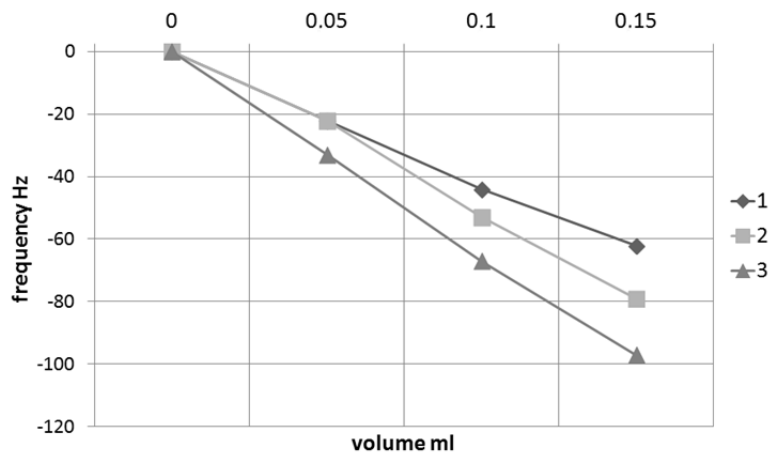


Рис. 17. Зависимость резонансной частоты УЗКС с инструментом 1 от объема модельной жидкости при работе на основной резонансной частоте:

1 – спирт, 2 – вода, 3 – глицерин

Fig. 17. Variation of the resonance frequency of the ultrasonic vibrating system with tool 1 on the volume of the model fluid when operating at the main resonant frequency:

1 is alcohol, 2 is water, 3 is glycerin

В таком случае можно ввести коэффициент пропорциональности между зависимостями частоты от массы и объема, основанный на плотности распыляемой жидкости. Этот способ мало пригоден для практического применения, так как при этом придется вносить данные о жидкости.

Однако если на начальном этапе процесса на распылительную поверхность подать известный тестовый объем жидкости, то этот процесс может быть автоматизирован. В этом случае объем жидкости на поверхности распылительного инструмента можно вычислить по формуле

$$V_m = (\Delta F \cdot V_{tst}) / (\Delta F_{tst}), \quad (2)$$

где V_m – объем распыляемой жидкости; ΔF – изменение резонансной частоты; V_{tst} – тестовый объем жидкости; ΔF_{tst} – изменение резонансной частоты при от тестового объема жидкости.

Принцип реализации процесса измерения в этом случае заключается в предварительном проведении измерения на образце распыляемой жидкости заранее известного объема. Получая объем жидкости, находящийся на поверхности рабочего инструмента, и зная диаметр рабочего инструмента (площадь поверхности), можно найти среднюю толщину слоя распыляемой жидкости с использованием выражения

$$h = V_m / S, \quad (3)$$

где h – средняя толщина слоя распыляемой жидкости; V_m – объем жидкости полученный в результате измерения; S – площадь распылительного инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате экспериментальных исследований зависимости подтвердили возможность косвенного контроля толщины (массы) распыляемого материала на колеблющейся поверхности УЗКС. Основным контролируемым параметром является изменение резонансной частоты УЗКС при формировании на ее рабочей поверхности распыляемого материала. Контроль резонансной частоты УЗКС на удвоенной частоте позволяет повысить точность получаемых результатов. Применение несложных математических вычислений (пригодных для реализации на микроконтроллерах) позволит рассчитывать среднюю толщину слоя распыляемой жидкости и обеспечивать установку необходимой толщины слоя.

Вместе с тем представляют интерес дальнейшие исследования при работе УЗКС на повышенной мощности. Это должно повысить стабильность работы рабочих инструментов с увеличенной площадью распылительной поверхности на повышенных частотах и получить более детальные зависимости частотных характеристик с применением различных модельных жидкостей (масла, смолы и т. п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ramisety K.A., Pandit A.B., Gogate P.R.* Investigations into ultrasound induced atomization // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2013. – Vol. 20. – P. 254–264.
2. *Berger H.L.* Ultrasonic liquid atomization. – Hyde Park, NY: Partridge Hill Publishers, 1998.
3. *Экнадиосянц О.К.* Получение аэрозолей // *Физические основы ультразвуковой технологии* / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – С. 337–395.
4. Spray coating for MEMS, NEMS and micro systems / B. Wieder, C. Brubaker, T. Glinser, P. Kettner, N. Nodes // *Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies*. – Xiamen, China, 2002. – P. 135–138.
5. High-frequency ultrasonic atomization with pulsed excitation / A. Lozano, H. Amadeva, F. Barreras, X. Jordà, M. Lozano // *Journal of Fluids Engineering*. – 2003. – Vol. 125. – P. 941–945.
6. Using ultrasonic atomization to produce an aerosol of micron scale particles / T.D. Donnelly, J. Hogan, A. Mugler, M. Schubmehl, N. Schommer, A.J. Bernoff, S. Dasnurkar, T. Ditmire // *Review of Scientific Instruments*. – 2005. – Vol. 76. – P. 113301-1–113301-10.
7. *Новицкий Б.Г.* Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (процессы и аппараты химической и нефтехимической техники). – М.: Химия, 1983. – 192 с.
8. *Shalunov A.V., Khmelev V.N., Smerdina E.S.* The cavitation spraying of the viscous liquids // *International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: workshop proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2006. – P. 269–273.
9. An experimental study of micron-scale droplet aerosols produced via ultrasonic atomization / T.D. Donnelly, J. Hogan, A. Mugler, N. Schubmehl, M. Schommer, A.J. Bernoff, B. Forrest // *Physics of Fluids*. – 2004. – Vol. 16 (8). – P. 2843–2851.
10. *Sindayihebura D., Dobre M., Bolle L.* Experimental study of thin liquid film ultrasonic atomization. High speed photography of ultrasonic atomization / B. Howard. – Brown university, 2010. – 39 p.
11. *Макаров Л.О.* Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии. – М.: Машиностроение, 1983. – 56 с.
12. *Теумин И.И.* Ультразвуковые колебательные системы. – М.: Машгиз, 1959. – 331 с.
13. *Гершгал Д.А., Фридман В.М.* Ультразвуковая технологическая аппаратура. – М.: Энергия, 1976. – 318 с.
14. The system of checking and operating power of ultrasonic technological apparatus / A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, A.N. Slivin, S.N. Tchyganok // *Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2001: workshop proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2001. – P. 54, 55.
15. Adjusting and Calibration Electronic Ultrasonic Generators / A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, S.N. Tchyganok, V.N. Steer, A.N. Lebedev // *Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: workshop proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2003. – P. 202–204.

16. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнологические установки. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.
17. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.
18. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 248 с.
19. Theoretical and experimental study of transducers aimed at low-frequency ultrasonic atomization of liquids / D. Sindayihebura, L. Bolle, A. Cornet, L. Joannes // Journal of the Acoustical Society of America. – 1998. – Vol. 103. – P. 1442–1448.
20. Балдев Р., Раджендран В., Паланиччи П. Применения ультразвука. – М.: Техносфера, 2006. – 576 с.
21. Measuring instrument of impedance characteristics of the ultrasonic vibrating systems / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, E.V. Pchenko // 19th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2018: workshop proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – P. 347–349.

Хмелев Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – ультразвуковые технологии и оборудование. Имеет более 800 публикаций. E-mail: vnh@bti.secna.ru

Шалунов Андрей Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой МСИА Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – процессы ультразвуковой коагуляции, ультразвуковое оборудование. Имеет более 350 публикаций. E-mail: shalunov@bti.secna.ru

Генне Дмитрий Владимирович, инженер кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – ультразвуковое распыление, ультразвуковые генераторы. Имеет более 140 публикаций. E-mail: gdv@bti.secna.ru

Барсуков Роман Владиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – ультразвуковые электронные генераторы, ультразвуковое оборудование. Имеет более 290 публикаций. E-mail: roman@bti.secna.ru

Нестеров Виктор Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры МСИА Бийского технологического института (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – ультразвуковые технологии, разработка ультразвуковых колебательных систем. Имеет более 180 публикаций. E-mail: nva@bti.secna.ru

Khmelev Vladimir Nikolawich, D.Sc. (Eng.), professor, deputy director for research in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov, His research interests are focused on ultrasonic technologies and equipment. He is the author of over 800 publications. E-mail: vnh@bti.secna.ru

Shalunov Andrei Victorovich, D.Sc. (Eng.), associate professor, head of the MSIA department in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov, His research interests are focused on the processes on ultrasonic coagulation and ultrasonic equipment. He has published more than 350 research papers. E-mail: shalunov@bti.secna.ru

Genne Dmitry Vladimirovich, an engineer at the MSIA department in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov, His research interests are focused on ultrasonic spraying and ultrasonic generators. He has published over 140 research papers. E-mail: gdv@bti.secna.ru

Barsukov Roman Vladislalovich, PhD (Eng.), an associate professor at the MSIA department in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov, His research interests are focused on ultrasonic electronic generators and ultrasonic equipment. He is the author of more than 290 publications. E-mail: roman@bti.secna.ru

Nesterov Victor Alexandrovich, PhD (Eng.), an associate professor at the MSIA department in the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai Technical University named after I.I. Polzunov, His research interests are focused on ultrasonic technologies and development of ultrasonic oscillating systems. He is the author of over 180 publications. E-mail: nva@bti.secna.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-97-114

Investigation of the thickness effect of a sprayed liquid layer on the frequency characteristics of an oscillatory system*

V.N. KHMELEV^a, A.V. SHALUNOV^b, D.V. GENNE^c,
R.V. BARSUKOV^d, V.A. NESTEROV^e

Technological Institute (branch) of Altai Technical University after I.I. Polzunov, 27 Trofimova Street, Biysk, 659305, Russian Federation

^a vnh@bti.secna.ru ^b shalunov@bti.secna.ru ^c gdv@bti.secna.ru
^d roman@bti.secna.ru ^e nva@bti.secna.ru

Abstract

Ultrasonic spraying of liquids allows obtaining aerosols with high consumer characteristics. For this reason, ultrasonic spray equipment is used in many fields. In science it is used for creating new substances, spray drying, etc. In medicine it is used for spraying an anticoagulant into blood collection tubes, and spraying drugs onto coronary stents. In technology it is used for spraying photoreists in the manufacture of semiconductors and spraying various sensitive and protective coatings).

It is known that any impact on the working tool of an ultrasonic oscillatory system leads to a change in its characteristics, for example, to a change in the resonant frequency. By monitoring changes in the characteristics of ultrasonic spray systems, it is possible to determine the volume of the sprayed liquid (attached mass) on the surface of the working end. Also, the “added mass” influences other characteristics of the spray ultrasonic oscillatory system, for example the phase-frequency characteristic, resistance at the resonance frequency and “antiresonance”. This allows not only determining the thickness of the sprayed layer. It makes it possible to determine the properties of the sprayed liquid itself. Obtaining and processing this information will allow us in the future to automatically test sprayed liquids with a subsequent automatic selection of the optimal mode.

In this regard, it is urgent to develop methods for indirect control of the properties of sprayed substances, the creation of algorithms and techniques to automate the process of monitoring ultrasonic atomization. The article deals with the development of a scientific basis for the automation of the ultrasonic atomization process by developing indirect control of the thickness (mass) of the layer of atomized liquid on the working surface of the ultrasonic oscillatory system.

Keywords: optimal layer, ultrasonic atomization, aerosol, capillary waves, change in resonant frequency, average thickness of the sprayed liquid layer, added mass, working tool

REFERENCES

1. Ramisetty K.A., Pandit A.B., Gogate P.R. Investigations into ultrasound induced atomization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, vol. 20, pp. 254–264.
2. Berger H.L. *Ultrasonic liquid atomization*. Hyde Park, NY, Partridge Hill Publishers, 1998.
3. Eknadiosyants O.K. Poluchenie aerolei [Obtaining aerosols]. *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Physical bases of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 337–395.
4. Wiedner B., Brubaker C., Glinser T., Kettner P., Nodes N. Spray coating for MEMS, NEMS and micro systems. *Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies*, Xiamen, China, 2002, pp. 135–138.
5. Lozano A., Amadeva H., Barreras F., Jordà X., Lozano M. High-frequency ultrasonic atomization with pulsed excitation. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, vol. 125, pp. 941–945.

* Received 22 December 2018.

The study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00121).

6. Donnelly T.D., Hogan J., Mugler A., Schubmehl M., Schommer N., Bernoff A.J., Dasnurkar S., Ditmire T. Using ultrasonic atomization to produce an aerosol of micron scale particles. *Review of Scientific Instruments*, 2005, vol. 76, pp. 113301-1–113301-10.
7. Novitskii B.G. *Primenenie akusticheskikh kolebaniy v khimiko-tehnologicheskikh protsessakh (protsessy i apparaty khimicheskoi i neftekhimicheskoi tekhniki)* [The use of acoustic oscillations in chemical-technological processes (Processes and apparatuses of chemical and petrochemical technology)]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 192 p.
8. Shalunov A.V. Khmelev V.N. Smerdina E.S. The cavitation spraying of the viscous liquids. *International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: workshop proceedings*. Novosibirsk, 2006, pp. 269–273.
9. Donnelly T.D., Hogan J., Mugler A., Schubmehl M., Schommer N., Bernoff A.J., Forrest B. An experimental study of micron-scale droplet aerosols produced via ultrasonic atomization. *Physics of Fluids*, 2004, vol. 16 (8), pp. 2843–2851.
10. Sindayihapura D., Dobre M., Bolle L. *Experimental study of thin liquid film ultrasonic atomization*. Howard B. *High speed photography of ultrasonic atomization*. Brown university, 2010. 39 p.
11. Makarov L.O. *Akusticheskie izmereniya v protsessakh ul'trazvukovoi tekhnologii* [Acoustic measurements in the processes of ultrasonic technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 56 p.
12. Teumin I.I. *Ul'trazvukovye kolebatel'nye sistemy* [Ultrasonic oscillatory systems]. Moscow, Mashgiz Publ., 1959. 331 p.
13. Gershgal D.A., Fridman V.M. *Ul'trazvukovaya tekhnologicheskaya apparatura* [Ultrasonic the technological equipment]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 318 p.
14. Shalunov A.V. Khmelev V.N. Barsukov R.V. Slivin A.N. Tchyganok S.N. The system of checking and operating power of ultrasonic technological apparatus. *Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2001: workshop proceedings*. Novosibirsk, 2001, pp. 54, 55.
15. Shalunov A.V. Khmelev V.N. Barsukov R.V. Tsyganok S.N. Steer V.N. Lebedev A.N. Adjusting and calibration electronic ultrasonic generators. *Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: workshop proceedings*. Novosibirsk, 2003, pp. 202–204.
16. Donskoi A.V., Keller O.K., Kratysh G.S. *Ul'trazvukovye elektrotehnologicheskije ustanovki* [Ultrasonic electrotechnological utility]. 2nd ed. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 208 p.
17. Zernov N.V., Karpov V.G. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepei* [Theory of radio engineering circuits]. Leningrad, Energiya Publ., 1972. 816 p.
18. Kolesnikov A.E. *Ul'trazvukovye izmereniya* [Ultrasonic measurements]. 2nd ed. Moscow, Standards Publishing House, 1982. 248 p.
19. Sindayihapura D., Bolle L., Cornet A., Joannes L. Theoretical and experimental study of transducers aimed at low-frequency ultrasonic atomization of liquids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, vol. 103, pp. 1442–1448.
20. Baldev R., Rajendran V., Palanichamy P. *Science and technology of ultrasonics*. New Delhi, Narosa Publishing House, 2003 (Russ. ed.: Baldev R., Radzhendran V., Palanichami P. *Primeneniya ul'trazvuka*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 576 p.).
21. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Genne D.V., Ilchenko E.V. Measuring instrument of impedance characteristics of the ultrasonic vibrating systems. *19th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2018: workshop proceedings*. Novosibirsk, 2018, pp. 347–349.

Для цитирования:

Исследование влияния толщины слоя жидкости на частотные характеристики колебательной системы / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Д.В. Генне, П.В. Барсуков, В.А. Нестеров // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 97–114. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-97-114.

For citation:

Khmelev V.N., Shalunov A.V., Genne D.V., Barsukov R.V., Nesterov V.A. Issledovanie vliyaniya tolshchiny sloya zhidkosti na chastotnye kharakteristiki kolebatel'noi sistemy [Investigation of the thickness effect of a sprayed liquid layer on the frequency characteristics of an oscillatory system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 97–114. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-97-114.

УДК 621.311

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-115-134

Применение алгоритмов роевого интеллекта в управлении генерирующим потребителем с возобновляемыми источниками энергии*

В.З. МАНУСОВ^а, П.В. МАТРЕНИН^б, Н. ХАСАНЗОДА^с

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

^а manusov36@mail.ru ^б pavel.matrenin@gmail.com ^с nasrullo-5445@mail.ru

В работе рассмотрена задача оптимального управления генерирующим потребителем с возобновляемыми источниками энергии в интеллектуальной сети с распределенной генерацией и двусторонними потоками энергии. Показано, что управление необходимо выполнять в недетерминированных условиях из-за невозможности точного прогнозирования выработки электроэнергии возобновляемыми источниками. Для управления генерирующим потребителем использована модель выбора управляющих действий на основе логических правил, что приводит к необходимости решения задачи структурно-параметрической оптимизации списка правил и значений их численных параметров. В отличие от существующих исследований, рассмотрена задача оптимального управления с точки зрения отдельного генерирующего потребителя, а не всей распределенной системы, а также управление без использования в явном виде прогнозов выработки и потребления. Решение данной задачи оптимизации выполнено тремя алгоритмами роевого интеллекта (алгоритм роя частиц, алгоритм пчел, алгоритм светлячков) и алгоритмом градиентного спуска. Вычислительные эксперименты проведены для моделей ветроэнергетических систем на дальневосточных островах Русский и Попова. Полученные результаты показали высокую эффективность роевых алгоритмов, которые продемонстрировали надежную и быструю сходимость к глобальному экстремуму задачи оптимизации при различных вариантах взаимодействия и различных параметрах генерирующих потребителей. Также проведен анализ влияния емкости аккумуляторных батарей генерирующего потребителя на вариативность его действий и в конечном счете на повышение выгоды от взаимобмена электроэнергии с внешней электроэнергетической системой и соседними генерирующими потребителями. Дано обоснование экономической выгоды от повышения емкости накопителей энергии до определенного предела, который может быть определен предложенным в работе способом.

Ключевые слова: генерирующий потребитель, роевой интеллект, структурно-параметрическая оптимизация, оптимальное управление, возобновляемая энергетика, интеллектуальные сети

* Статья получена 28 февраля 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий возобновляемой энергетики позволяет потребителям электроэнергии получать ее не только от внешней централизованной системы, но и от своих собственных источников, таких как ветроэнергетические установки (ВЭУ) и солнечные панели. Если у потребителя выгодные с точки зрения возобновляемых источников энергии климатические условия и имеется возможность по размещению достаточного числа ВЭУ или солнечных панелей, чтобы вырабатывать значительно больше собственных потребностей, то потребитель может не только получать электроэнергию от внешней системы, но и отдавать ей свои избытки. При этом возникает принципиально важный для реализации концепции Smart Grid двусторонний поток энергии и информации, а потребитель в этом случае может быть назван «генерирующим потребителем» (ГП) [1]. Так как стоимость электроэнергии для потребителя не является неизменной величиной, возникает задача оптимального управления ГП. Суть задачи – регулировать потоки электроэнергии, то есть определять, в какой момент времени продавать энергию внешней системе, в какой – покупать, когда и какое количество энергии запасать в аккумуляторах или, наоборот, брать ранее накопленную энергию.

Генерирующий потребитель функционирует в условиях стохастического изменения выработки электроэнергии возобновляемыми источниками и в меньшей степени – собственного потребления. Кроме того, задача управления имеет высокую размерность пространства поиска решений, а целевая функция не является аналитическим выражением, а рассчитывается алгоритмически. Поэтому задача требует применения методов, позволяющих решать подобные сложные задачи оптимизации. К таким методам относятся метаэвристические стохастические методы.

Оптимальному управлению в сетях Smart Grid с распределенной генерацией и возобновляемыми источниками энергии посвящено множество современных исследований, таких как [2–4]. Однако в них оптимальное управление осуществляется на уровне надсистемы, а не отдельных ГП. Такое управление позволяет учитывать данные обо всех участниках распределенной электроэнергетической системы, но возникает риск, связанный с централизацией управления. В работе [5], напротив, рассматривается оптимизационная задача управления изолированными электроэнергетическими системами без обмена с другими ГП или глобальной электроэнергетической системой страны. При этом в указанной работе особое внимание посвящено выбору накопителя электроэнергии.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Характеристика генерирующих потребителей. Рассмотрены два крупных ГП: энергосистема острова Русский и энергосистема острова Попова. Данные о скорости ветра позволяют сделать прогноз, согласно которому возможно создание ветроэлектростанций (ВЭС) до 16 МВт на острове Русский и до 20 МВт на острове Попова [6]. Схема передачи электроэнергии в сеть электроснабжения островов Русский (ГП1) и Попова (ГП2) показана на рис. 1.

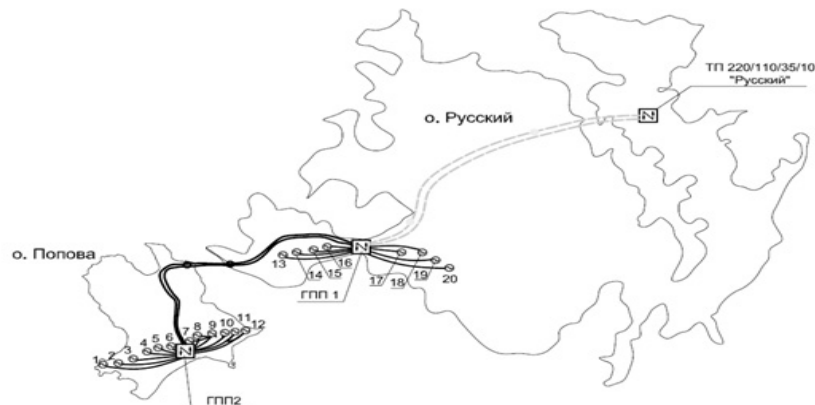


Рис. 1. Передача электроэнергии к распределительному устройству 35 кВ подстанции «Русская»

Fig. 1. Power transmission to the 35 kV switchgear of the Russkaya substation

По имеющимся данным о скорости ветра [6] можно дать оценку возможной мощности ГП, для этого была построена характеристика мощности ветроустановки типа WTU 2,05 МВт, показанная на рис. 2. Выше скорости 25 м/с ВЭУ отключается в целях безопасности.

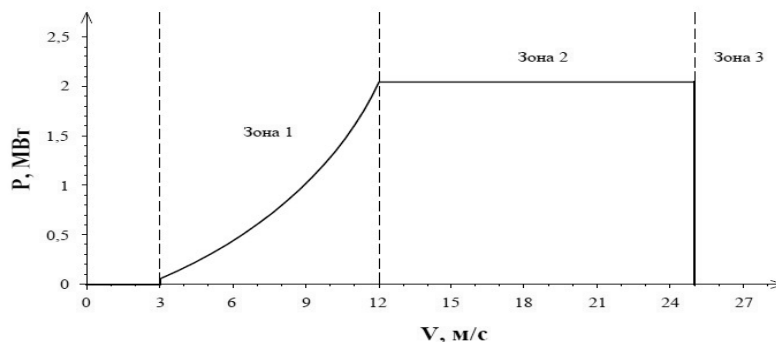


Рис. 2. Характеристика мощности ВЭУ WTU 2,05 МВт

Fig. 2. Power characteristic of the wind power plant WTU 2,05 MW

Задача оптимального управления. Задача оптимального управления заключается в создании управляющей системы, которая бы реализовывала последовательность воздействий на управляемый объект таким образом, чтобы достичь наилучшего возможного качества, заданного одним или несколькими критериями. Под управляемым объектом (объектом управления) понимается некоторая часть окружающего мира, на которую субъект управления может целенаправленно воздействовать [7] (рис. 3).

Подробное описание принципов оптимального управления можно найти в работах [7, 8]. Управление всегда происходит в течение некоторого периода времени, при этом управляемый объект переходит из одного состояния в другое. Состояние объекта управления характеризуется набором параметров, которые могут изменяться с течением времени: $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$. Таким образом, имеется вектор функций, каждая из которых показывает

изменение параметра объекта с течением времени. Эти функции в явном виде, как правило, неизвестны. Кроме того, имеется управляющая система, которая осуществляет управление. Управление может быть также задано как вектор функций $A(t) = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_m(t)\}$. Используются обозначения S от «state» и A от «action».



Рис. 3. Схема взаимодействия объекта, субъекта и среды

Fig. 3. The object, subject and environment interaction scheme

Для ГП параметрами состояния будут три величины ($n = 3$):

– собственные потребности в электроэнергии в данный момент, МВт · ч (s_1);

– выработка электроэнергии, МВт · ч (s_2);

– запас энергии в аккумуляторе в данный момент, МВт · ч (s_3).

Параметрами управления будут три другие величины ($m = 3$):

– количество электроэнергии, которой в данный момент ГП обменивается с внешней системой (покупка или продажа), МВт · ч (a_1);

– количество электроэнергии, которой в данный момент ГП обменивается с соседним ГП (покупка или продажа), МВт · ч (a_2);

– количество электроэнергии, которую в данный момент ГП аккумулирует или расходует из аккумулятора, МВт · ч (a_3).

Управление не влияет на параметры состояния, связанные с собственными потребностями ГП и выработкой ВЭУ, но непосредственно влияют на количество энергии в аккумуляторе. В данной задаче шаг времени положен равным одному часу. Так что за сутки имеется 24 значения по каждому из трех параметров состояния ГП и 24 значения по каждому из трех параметров управления. Пример приведен на рис. 4.

Задача оптимального управления в общем виде может быть записана следующим образом:

$$A^{opt}(t) = \operatorname{argmax}_{A(t) \in A_{\text{доп}}} \int_{t_0}^{t_T} f(t, S(t), A(t)) dt, \quad (1)$$

где $A^{opt}(t)$ – искомое оптимальное управление, то есть указания, какие значения в какой момент времени должны принимать параметры управления (когда, сколько и кому продавать или покупать, запасать в аккумулятор или наоборот); $A_{\text{доп}}$ – область допустимых значений параметров управления; $f(t, S(t), A(t))$ – функция $n + m + 1$ переменных, задающая некоторым образом

выгоду в зависимости от параметров объекта управления, от параметров управления, а также от состояния окружающей среды (например, для ГП это тариф на электроэнергию в текущее время суток); t_0 и t_T – заданный диапазон времени, на котором рассматривается управление.

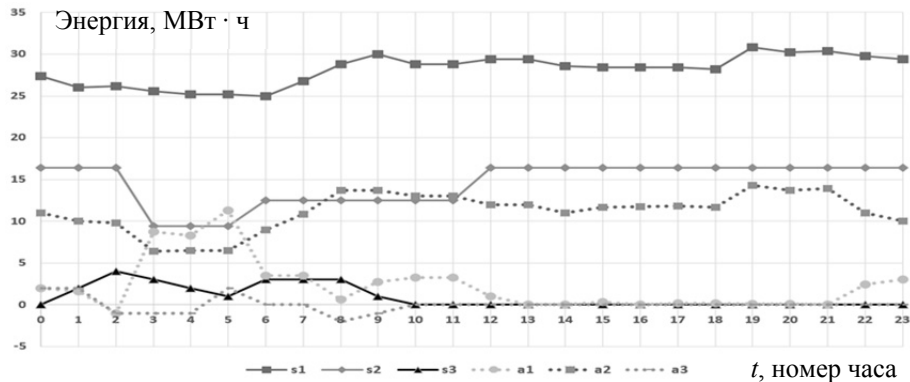


Рис. 4. Пример суточных графиков состояний и действий ГП

Fig. 4. A sample of daily charts of GC's states and actions

Из-за высокой сложности электроэнергетических систем в явном аналитическом виде функцию $f(t, S(t), A(t))$ обычно получить нельзя, тем более ее интеграл. Но можно задать ее алгоритмически. В примере для ГП данная функция является кусочно-непрерывной, так как шаг времени равен одному часу. Задачу (1) можно записать без интеграла, в виде суммы, а функция $f(t, S(t), A(t))$ является не чем иным, как разницей между доходами от продажи электроэнергии ГП и расходами на ее покупку, генерацию и аккумуляцию за один определенный час. Однако даже в этом случае аналитическое выражение для $f(t, S(t), A(t))$ записать затруднительно, так как цена на электроэнергию является кусочно-постоянной функцией, обмен электроэнергией с соседним ГП зависит от его состояния и управления им. Таким образом, расчет значения $f(t, S(t), A(t))$ необходимо выполнять алгоритмически.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Управление на основе правил. Характерной чертой задачи (1) является допущение о принятии управленческого решения каждый час. При этом анализ показал, что все возможные управляющие действия можно описать, разделив их на четыре группы [9]. Далее использованы следующие обозначения:

- power_wind – выработка ВЭУ за рассматриваемый час;
- power_gc – потребление ГП за рассматриваемый час;
- dif – разность выработки ВЭУ и потребления ГП за рассматриваемый час;
- ассим – количество энергии, которое нужно добавить в аккумулятор (> 0) или изъять из него (< 0) за рассматриваемый час;
- pow_ассим – энергия, запасенная в аккумуляторе по состоянию на рассматриваемый час;

- max_accum – максимальное количество энергии, которое может быть запасено в аккумуляторе (константа, параметр ГП);
- max_accum_hour – максимальное количество энергии, которое может быть добавлено в аккумулятор за один час (константа, параметр ГП);
- sale_accum – коэффициент, который регулирует баланс покупки и накопления (настраиваемый в процессе оптимизации параметр ГП);
- sale_unload – коэффициент, который регулирует баланс продажи и использования накопленного (настраиваемый в процессе оптимизации параметр ГП);
- sale_buy – количество энергии, которая продана внешней системе или соседнему ГП (> 0) или куплена у них (< 0) за рассматриваемый час.

Указанные 4 группы возможных управляющих действий [4]:

1. Накопить-продать (действие возможно только при избытке энергии).

- 1.1. $\text{dif} = \text{power_wind} - \text{power_gc}$;
- 1.2. $\text{accum} = \min(\text{max_accum} - \text{now_accum}, \text{max_accum_hour})$;
- 1.3. $\text{accum} = \text{accum} * \text{sale_accum}$;
- 1.4. $\text{now_accum} = \text{now_accum} + \text{accum}$;
- 1.5. $\text{sale_buy} = \text{dif} - \text{accum}$.

2. Накопить-купить:

- 2.1. $\text{dif} = \text{power_wind} - \text{power_gc}$;
- 2.2. $\text{accum} = \min(\text{max_accum} - \text{now_accum}, \text{max_accum_hour})$;
- 2.3. $\text{accum} = \text{accum} * \text{buy_accum}$;
- 2.4. $\text{now_accum} = \text{now_accum} + \text{accum}$;
- 2.5. $\text{sale_buy} = \text{dif} - \text{accum}$.

3. Изъять-продать

- 3.1. $\text{dif} = \text{power_wind} - \text{power_gc}$;
- 3.2. $\text{accum} = \text{now_accum}$;
- 3.3. $\text{accum} = \text{accum} * \text{sale_unload}$;
- 3.4. $\text{now_accum} = \text{now_accum} - \text{accum}$;
- 3.5. $\text{sale_buy} = \text{dif} + \text{accum}$.

4. Изъять-купить (действие возможно только при дефиците энергии):

- 4.1. $\text{dif} = \text{power_wind} - \text{power_gc}$;
- 4.2. $\text{accum} = \min(-\text{dif}, \text{now_accum})$;
- 4.3. $\text{accum} = \text{accum} * \text{buy_unload}$;
- 4.4. $\text{now_accum} = \text{now_accum} - \text{accum}$;
- 4.5. $\text{sale_buy} = \text{accum} - \text{dif}$.

Выбор действий должен зависеть от состояния ГП, но достаточно получить ответы на два вопроса. Первый, очевидно, связан с определением, находится ли ГП в состоянии избытка или дефицита энергии. Второй связан с тем, что цена на электроэнергию меняется в течение суток. Хотя возможны и различные схемы тарификации, в работе рассмотрен двузонный тариф, дневной тариф с 7 часов до 23 часов, а в остальные часы – ночной, более дешевый. Таким образом, нужно получить ответы на вопросы:

– без учета накопления покрывает ли выработка ВЭУ собственные потребности ГП ($\text{diff} > 0$)?

– действует ли сейчас особый период времени?

В управлении ГП учтена возможность использования двух интервалов, попадание в которые считается особым периодом ($\text{time1} - \text{time2}$, $\text{time3} - \text{time4}$),

значения границ интервалов являются настраиваемыми в процессе оптимизации параметрами.

В результате возникают четыре возможные предпосылки в условии:

- (diff < 0) И НЕ (особый период времени);
- (diff > 0) И НЕ (особый период времени);
- (diff < 0) И (особый период времени);
- (diff > 0) И (особый период времени).

Второе и третье действия могут быть выполнены при любом из данных четырех условий. Первое и четвертое действия – только в половине случаев, первое – когда $\text{diff} > 0$ (избыток), четвертое – когда $\text{diff} < 0$ (дефицит).

При создании управления ГП на основе правил получаем 12 правил вида
IF условие, THEN действие.

Количество правил равно 12, так как второе и третье действия могут быть выполнены при любом условии из четырех, а первое и четвертое – при двух условиях ($2 \cdot 4 + 2 \cdot 2 = 12$). Кроме того, в модели управления ГП имеется четыре коэффициента баланса: `buy_unload`, `sale_unload`, `buy_accum`, `sale_accum` и четыре момента времени: `time1`, `time2`, `time3`, `time4`.

Для управления с использованием данных правил необходимо определить порядок их проверки, то есть приоритеты. Принятие решения начинается с проверки наиболее приоритетного правила. Если его условие выполнено, то реализуется соответствующее действие этого правила. Иначе проверяется следующее по приоритету правило, и так до конца списка правил. Условия составлены таким образом, что при проходе по списку правил обязательно будет найдено такое, условие которого выполнено.

В итоге для построения управления необходимо определить порядок правил с помощью задания приоритетов (`pri`) и настраиваемые параметры, указанные выше:

$\text{Par} = [\text{pri}_1, \dots, \text{pri}_{12}, \text{buy_unload}, \text{sale_unload}, \text{buy_accum}, \text{sale_accum}, \text{time}_1, \dots, \text{time}_4]$

Очень важна также емкость накопителя электроэнергии. Но поскольку в процессе функционирования ГП она не меняется, этот параметр вынесен за пределы задачи оптимального управления. Для исследования его влияния все расчеты проведены для нескольких значений емкости.

Алгоритмы роевого интеллекта. Алгоритмы роевого интеллекта являются одним из наиболее эффективных способов решения сложных задач оптимизации [10, 11]. Под сложными здесь понимаются нелинейные, недифференцируемые задачи высокой размерности со сложной топологией пространства поиска решения, со стохастическими и динамическими свойствами.

Как показано в многочисленных исследованиях, обзор которых дан в работе [11], заранее далеко не всегда невозможно определить наиболее подходящий для конкретной задачи алгоритм роевого интеллекта. Поэтому использование только одного алгоритма в задаче, где оптимальное решение неизвестно, может дать решение, эффективность которого невысока с точки зрения критерия оптимальности. При этом исследователь не может определить эффективность, не применив для сравнения другие алгоритмы. Поэтому в данном исследовании использованы три алгоритма роевого интеллекта: алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization), алгоритм светлячков (Firefly Optimization) и алгоритм пчел (Bee algorithm), который не следует путать с

алгоритмом колонии пчел (Artificial Bee Colony Optimization). Описания алгоритмов именно в том виде, в котором они использованы в настоящей работе, даны в [11].

Для применения роевых алгоритмов необходимо определить преобразование координаты частицы X в решение прикладной задачи. В данном случае решение задачи представляет собой управляющие действия $A(t)$, как показано в выражении (1). Поэтому необходимо координаты частицы X перевести в вектор Par , задающий приоритеты правил и значения параметров управления. Каждый элемент вектора X ограничен от 0 до 1 [11].

$$X = [x_1, \dots, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, \dots, x_{20}]$$

$$Par = [pr_1, \dots, pr_{12}, buy_unload, sale_unload, buy_accum, sale_accum, time_1, \dots, time_4].$$

Приоритеты являются вещественными числами от 0 до 1, так что $pr_i = x_i$, $i = 1, \dots, 12$. Параметры buy_unload , $sale_unload$, buy_accum , $sale_accum$ тоже принимают значения от 0 до 1, поэтому переводятся аналогично. Наконец, $time_1, \dots, time_4$ задают номер часа в сутках, поэтому достаточно умножить соответствующую координату на 23 и округлить результат в меньшую сторону (номер часа от 0 до 23). Значения свободных параметров роевых алгоритмов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Значения параметров роевых алгоритмов

Parameter values of the swarm algorithms

Алгоритм	Число частиц	Число итераций	Параметры
Частиц	200	500	$\alpha_1 = 1,5, \alpha_2 = 1,5, \omega = 0,7, \beta = 0,5$
Пчел	200	500	$n^s = 60, n^b = 6, n^g = 1, c^b = 20, c^g = 20,$ $rad = 0,01, rx = 0,05$
Светлячков	50	2000	$\alpha = 0,05, \beta = 1, \gamma = 0,5$

В метаэвристических алгоритмах оптимизации очень важен выбор свободных параметров (эвристических коэффициентов) алгоритмов. В настоящей работе отдельного исследования влияния эвристических коэффициентов не проводилось, были взяты несколько наборов значений, показавших высокую эффективность в предыдущих исследованиях авторов и полученных с помощью эволюционной адаптации роевых алгоритмов [11, 12].

Для алгоритма светлячков число частиц снижено в четыре раза, а число итераций повышено в четыре раза по сравнению с алгоритмами роя частиц и пчел. Это сделано, так как алгоритм светлячков требует на каждой итерации сравнения каждого светлячка с каждым, поэтому число операций на этапе перемещения частиц квадратично зависит от числа частиц. У двух других роевых алгоритмов эта зависимость линейная. Большую часть расчетов занимает вычисление целевой функции, требующее моделирования суточного цикла работы двух ГП. Тем не менее для выравнивания времени расчетов у алгоритма роя светлячков число частиц снижено. А чтобы число расчетов

целевой функции осталось одинаковым для всех роевых алгоритмов, число итераций алгоритма светлячков соответственно повышено.

Кроме роевых алгоритмов был применен более простой алгоритм градиентного спуска (gradient descent). Он был применен для сравнения, поскольку имеет принципиально иной принцип работы, чем метаэвристические роевые алгоритмы, хотя и для него существуют модификации со сложными эвристиками и их комбинациями [13], кроме того, имеет немного настроечных параметров по сравнению с роевыми алгоритмами. В работе использован градиентный алгоритм, который может быть записан рекуррентной формулой следующего вида:

$$X^{k+1} = X^k - \alpha \cdot \nabla f(X^k). \quad (2)$$

Алгоритм на каждом шаге k находит градиент целевой функции и на его основе делает шаг в направлении уменьшения целевой функции для задачи минимизации и увеличения для задачи максимизации. Величина шага зависит от величины градиента и коэффициента α . В данной работе коэффициент α равен $5 \cdot 10^{-5}$, а вектор X , как и для роевых алгоритмов, представляет собой вектор из 20 элементов от 0 до 1 и переводится в решение задачи точно так же, как и для роевых алгоритмов. Поскольку целевая функция не может быть продифференцирована, направление градиента определится численным методом путем нахождения приращения целевой функции по каждому элементу вектора X отдельно (приращение значения x_i равно $5 \cdot 10^{-5}$) и определением нормированной суммы полученных векторов.

3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Исходные данные. Вычислительные эксперименты проведены при одновременном рассмотрении ГП острова Русский и острова Попова. Так что при оптимизации строились одинаковые модели управления для обоих ГП. В табл. 2 показаны использованные в расчетах цены. Цена электроэнергии от ВЭУ учитывает затраты на строительство и обслуживание ВЭУ, аналогично и для накопителей. Также введено ограничение – аккумулировать за один час можно не более 2 МВт, табл. 3 содержит данные о выработке ВЭУ и собственных потребностях обоих ГП.

Моделирование суточного цикла. Методология применения рассмотренных алгоритмов роевого интеллекта показана на рис. 5. Для градиентного метода алгоритм подобный, только происходит вне цикла.

Процесс моделирования суточного цикла работы ГП происходит при расчете целевой функции. Он показан на рис. 6.

Рассмотрено три варианта функционирования ГП.

1. ГП может покупать электроэнергию у внешней системы, но не может продавать ей или обмениваться с соседним ГП (результаты в табл. 3).

2. ГП может покупать электроэнергию у внешней системы и может продавать ей, но не может обмениваться с соседним ГП (результаты в табл. 4).

3. ГП может покупать электроэнергию у внешней системы и может продавать ей, а также может обмениваться с соседним ГП (результаты в табл. 5).

Таблица 2

Table 2

Используемые цены электроэнергии**Electricity prices used**

Величина, МВт · ч	Цена, тыс. руб.
Выработка ВЭУ	2
Извлечение из аккумулятора	0,2
Продажа внешней электроэнергетической системе по дневному тарифу	2,7
Продажа внешней электроэнергетической системе по ночному тарифу	0,9
Покупка внешней электроэнергетической системой по дневному тарифу	3,2
Покупка внешней электроэнергетической системой по ночному тарифу	1,4
Продажа соседнему ГП по дневному тарифу	3,
Продажа соседнему ГП по ночному тарифу	1,4
Покупка у соседнего ГП по дневному тарифу	3
Покупка у соседнего ГП по ночному тарифу	1,4

Таблица 3

Table 3

Выработка ВЭУ и собственные потребности в электроэнергии ГП**The wind power plant generation and the GC's own electricity needs**

Номер часа	Выработка ВЭУ ГП ₁ , МВт	Собственные потребности ГП ₁ , МВт	Выработка ВЭУ ГП ₂ , МВт	Собственные потребности ГП ₂ , МВт
0	16	27,4	20,5	3,56
1	16,4	26	20,5	3,38
2	15	26,2	20,5	3,4
3	9,7	25,6	11,76	3,32
4	9,4	25,2	11,76	3,27
5	9,4	25,2	11,76	3,27
6	12,2	25	15,65	3,25
7	13,6	26,8	15,65	3,48
8	12,3	28,8	15,65	3,74
9	11,9	30	15,65	3,9
10	12,5	28,8	15,65	3,74
11	12,8	28,8	15,65	3,74
12	17,3	29,4	20,5	3,82
13	17,5	29,4	20,5	3,82
14	16,9	28,6	20,5	3,71
15	17,4	28,4	20,5	3,69
16	16,5	28,4	20,5	3,69
17	16,3	28,4	20,5	3,69
18	16,0	28,2	20,5	3,66
19	16,4	30,8	20,5	4,00
21	16,8	30,2	20,5	3,92
22	16,2	30,4	20,5	3,95
23	16,9	29,8	20,5	3,87

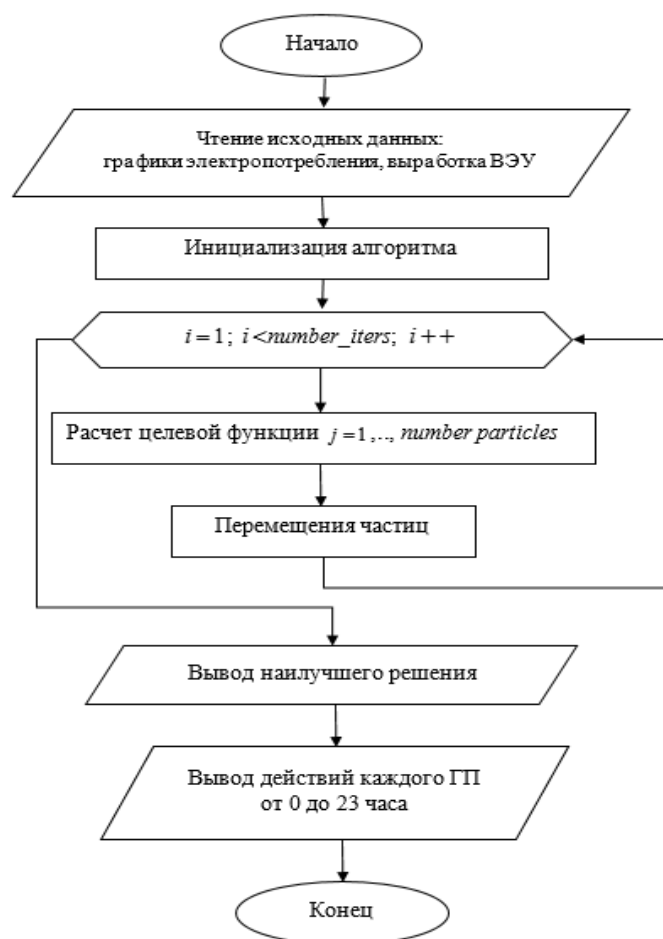


Рис. 5. Блок-схема алгоритма минимизации расходов ГП

Fig. 5. Block diagram of the algorithm of minimizing the costs of the GC

Результаты. В табл. 4–6 расходы ГП на электроэнергию за вычетом доходов от ее продажи показаны в миллионах рублей. Отрицательные значения означают, что ГП получил соответствующую прибыль, так как доход от продажи электроэнергии оказался выше расходов на ее выработку и накопление. Влияние энергии накопителей на снижение расходов ГП за счет оптимального управления показано на рис. 7–9 для трех указанных вариантов (слева ГП₁, справа ГП₂). При этом сплошная линия соответствует суммарным расходам обоих ГП при использовании роевых алгоритмов, пунктир с более длинными штрихами соответствует аналогичному показателю при использовании среднего результата градиентного спуска, с более короткими штрихами – при использовании наилучшего результата градиентного спуска. Под энергией накопителя понимается максимальное количество электроэнергии, которое может быть запасено в нем, так что расчеты потоков энергии можно проводить в одних единицах измерения.

Анализ результатов. Все алгоритмы запускались в каждом варианте по десять раз со случайными начальными условиями. При этом алгоритмы роевого интеллекта давали по каждому варианту одинаковое решение при каж-

дом запуске. Поэтому можно с высокой вероятностью считать, что они находили глобальные экстремумы для каждого варианта при каждом значении энергии накопителей. Градиентный спуск дал результаты незначительно хуже, но тем не менее ни в одном из запусков не позволил найти глобальный экстремум.

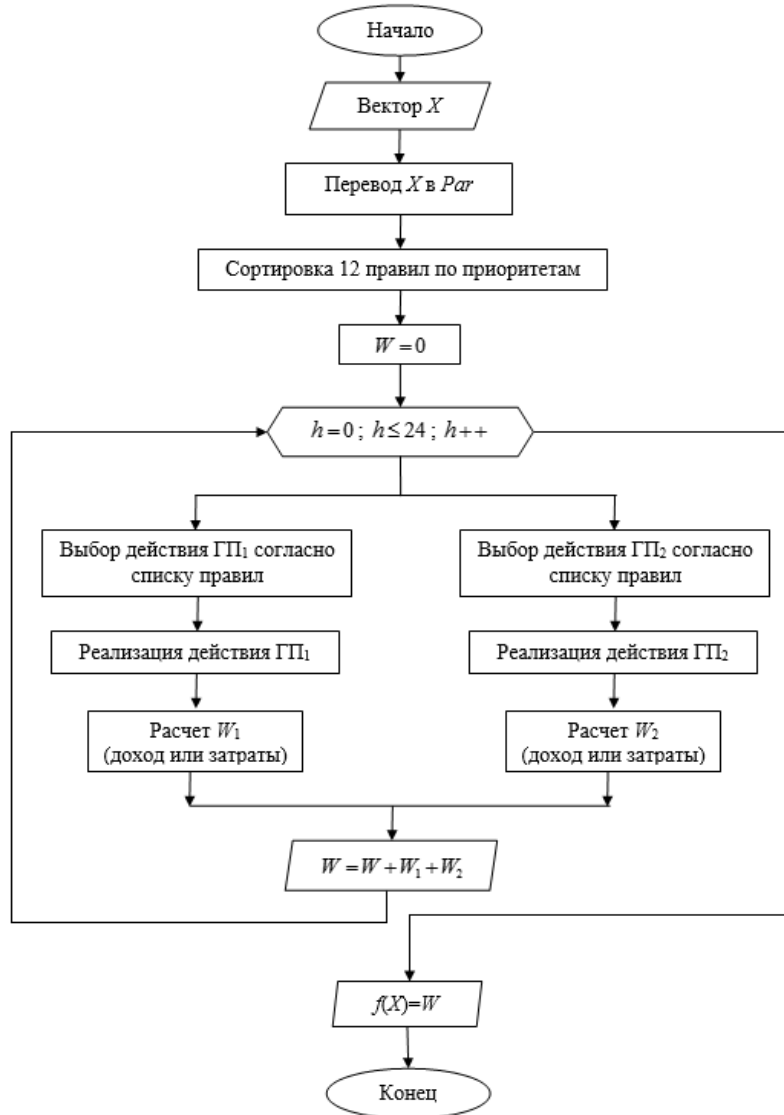


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчета целевой функции

Fig. 6. Block diagram of the algorithm for calculating the objective function

В данной задаче даже незначительное относительное отклонение результата от оптимального приводит к существенным потерям в абсолютном выражении. Кроме того, из рис. 7–9 видно, что при использовании даже лучших результатов градиентного спуска не удалось бы наглядно показать влияние максимальной энергии накопителей на итоговые расходы ГП. Для роевых

алгоритмов видно, что повышение максимальной энергии накопителей с каждым шагом в 2 МВт до величины 16 МВт снижает расходы ГП для каждого из вариантов. Исключение составляет лишь вариант, когда ГП₂ не может продавать избыток электроэнергии, но этот вариант наименее важен, так как принципиально важно иметь двусторонний поток электроэнергии.

Таблица 4

Table 4

Результаты оптимизации без возможности продажи электроэнергии внешней системе и без обмена между ГП (вариант 1)
Optimization results without the possibility of selling electricity to the external system and without an exchange between the GSs (option 1)

Энергия накопителя, МВт · ч	Рой частиц, рой пчел, рой светлячков		Градиент, среднее из 10		Градиент, лучшее из 10		Отклонение среднего градиента от оптимума, %	Отклонение лучшего градиента от оптимума, %
	ГП ₁ , расход в сут-ки	ГП ₂ , расход в сут-ки	ГП ₁ , расход в сут-ки	ГП ₂ , расход в сут-ки	ГП ₁ , расход в сут-ки	ГП ₂ , расход в сут-ки		
4,00	1,548	0,175	1,556	0,175	1,549	0,175	0,4	0,1
6,00	1,545	0,175	1,557	0,176	1,555	0,175	0,7	0,6
8,00	1,542	0,175	1,558	0,175	1,555	0,175	0,9	0,7
10,00	1,538	0,175	1,558	0,175	1,539	0,175	1,1	0,0
12,00	1,535	0,175	1,554	0,175	1,555	0,175	1,1	1,1
16,00	1,532	0,175	1,562	0,175	1,555	0,175	1,7	1,3
20,00	1,532	0,175	1,563	0,175	1,555	0,175	1,8	1,3
24,00	1,532	0,175	1,558	0,176	1,544	0,175	1,5	0,7

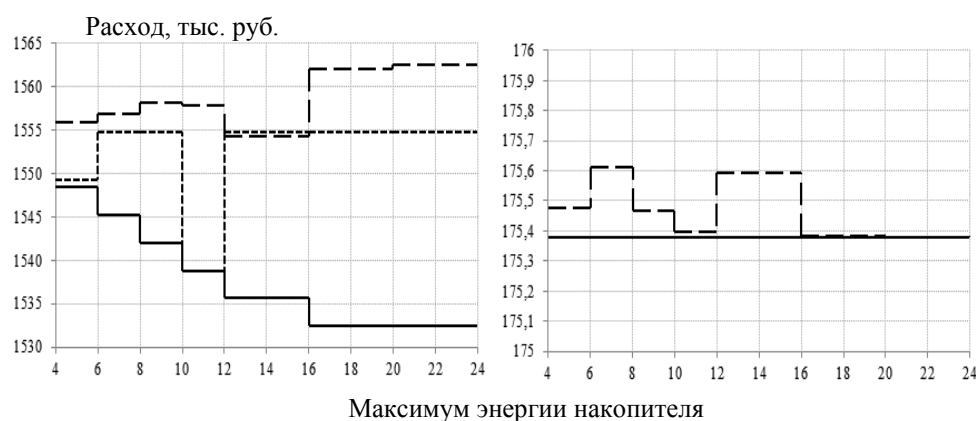


Рис. 7. Влияние максимальной энергии накопителей на снижение расходов ГП при оптимальном управлении (вариант 1)

Fig. 7. An effect of maximum battery energy on reducing the cost of GS with an optimal control (option 1)

Таблица 5

Table 5

Результаты оптимизации с возможностью продажи электроэнергии внешней системе и без обмена между ГП (вариант 2)

Optimization results with the possibility of selling electricity to the external system and without an exchange between the GSs (option 2)

Энергия накопителя, МВт · ч	Рой частиц, рой пчел, рой светлячков		Градиент, среднее из 10		Градиент, лучшее из 10		Отклонение среднего градиента от оптимума, %	Отклонение лучшего градиента от оптимума, %
	ГП ₁ , расход в сутки	ГП ₂ , расход в сутки	ГП ₁ , расход в сутки	ГП ₂ , расход в сутки	ГП ₁ , расход в сутки	ГП ₂ , расход в сутки		
4,00	1,546	0,111	1,553	0,112	1,548	0,114	0,7	0,3
6,00	1,543	0,107	1,553	0,112	1,555	0,110	0,9	0,9
8,00	1,539	0,105	1,550	0,109	1,544	0,107	0,8	0,4
10,00	1,536	0,100	1,551	0,109	1,539	0,114	1,5	1,0
12,00	1,533	0,096	1,550	0,107	1,536	0,102	1,7	0,5
16,00	1,523	0,092	1,553	0,100	1,538	0,096	1,9	0,7
20,00	1,530	0,092	1,549	0,107	1,533	0,096	2,1	0,4
24,00	1,530	0,092	1,554	0,101	1,555	0,096	2,1	1,8

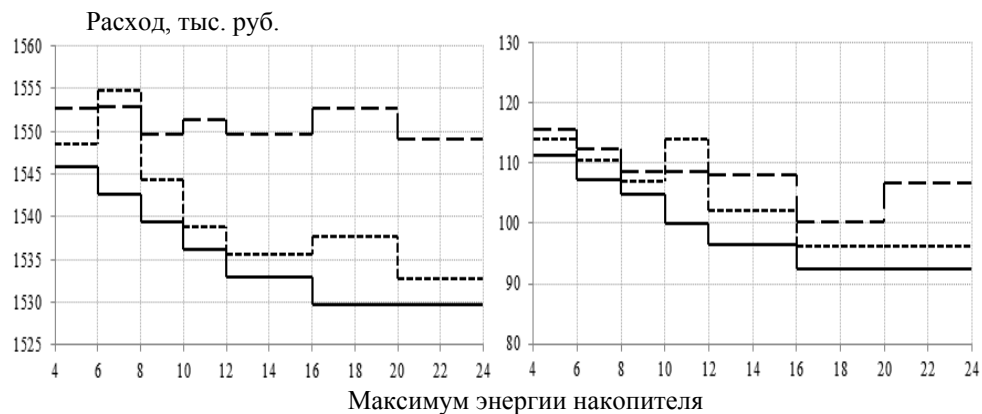


Рис. 8. Влияние максимальной энергии накопителей на снижение расходов ГП при оптимальном управлении, вариант 2

Fig. 8. An effect of maximum battery energy on reducing the cost of GS with an optimal control (option 2)

Таблица 6

Table 6

Результаты оптимизации с возможностью продажи электроэнергии внешней системе и обменом между ГП (вариант 3)

Optimization results with the possibility of selling electricity to the external system and with an exchange between the GSs (option 3)

Энергия накопителя, МВт · ч	Рой частиц, рой пчел, рой светлячков		Градиент, среднее из 10		Градиент, лучшее из 10		Отклонение среднего градиента от оптимума, %	Отклонение лучшего градиента от оптимума, %
	ГП ₁ , расход в сутки	ГП ₂ , расход в сутки	ГП ₁ , расход в сутки	ГП ₂ , расход в сутки	ГП ₁ , расход в сутки	ГП ₂ , расход в сутки		
4,00	1,505	0,006	1,512	0,014	1,509	0,009	1,0	0,4
6,00	1,502	0,002	1,512	0,012	1,507	0,006	1,3	0,7
8,00	1,498	-0,013	1,510	0,009	1,503	0,004	1,4	0,6
10,00	1,495	-0,002	1,511	0,007	1,500	0,000	1,7	0,5
12,00	1,492	-0,004	1,508	0,005	1,497	-0,002	1,7	0,5
16,00	1,489	-0,006	1,510	0,010	1,498	-0,003	2,5	0,8
20,00	1,489	-0,006	1,508	0,009	1,501	-0,002	2,2	1,0
24,00	1,489	-0,006	1,513	0,004	1,510	-0,007	2,3	1,4

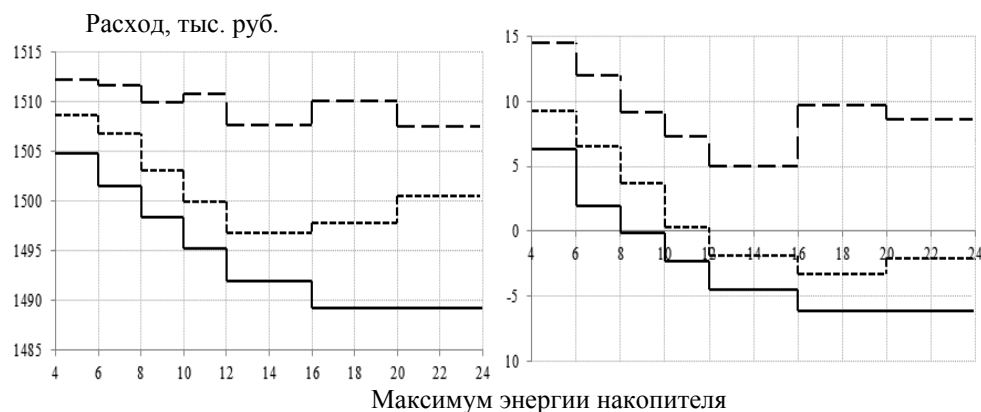


Рис. 9. Влияние максимальной энергии накопителей на снижение расходов ГП при оптимальном управлении, вариант 3

Fig. 9. An effect of maximum battery energy on reducing the cost of GS with an optimal control (option 3)

Суточные графики состояний и управляющих действий для ГП₁ (вариант 3 – обмен и с внешней электроэнергетической системой, и между ГП) при емкости накопителя 16 МВт показаны на рис. 10. Обозначения такие же, как использованы для рис. 4.

Из графика видно, что ГП₁ начинает запасать электроэнергию, пока действует более дешевый ночной тариф, а днем тратит ее. Потребности ГП₁

в электроэнергии всё время выше выработки его ВЭУ, поэтому ему требуется часть энергии покупать у внешней электроэнергетической системы, часть – у соседнего ГП₂. С трех до пяти часов ночи выработка ВЭУ снизилась у обоих ГП, поэтому на графике покупки электроэнергии у внешней системы ГП₁ наблюдается повышение в этот период времени (не может купить полностью у ГП₂, так как ГП₂ не способен столько продать в этот период). Хотя приходится покупать у внешней системы по более высокой цене, чем у соседнего ГП, процесс накопления энергии не останавливается, поскольку в ночной период покупка у внешней системы дешевле, чем покупка днем у соседнего ГП.

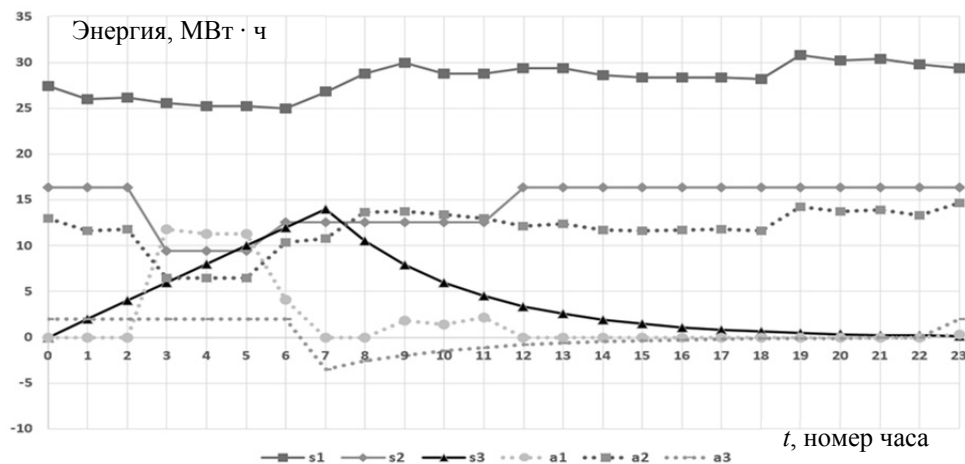


Рис. 10. Суточные графики состояний и действий ГП₁, пример после оптимизации

Fig. 10. Daily charts of the states and the actions of GS₁, the sample after optimization

Программная реализация и время расчетов. Данная задача не требует решения в режиме реального времени, поэтому в исследовании не уделялось большого внимания скорости расчетов. Алгоритмы реализованы на C++ без распараллеливания на процессоре i7-3630QM 2.4 Hz. Получение оптимального решения требовало 10...40 секунд. Разработанное приложение «Оптимизация режимов электропотребления при двусторонних потоках энергии путем выбора приоритетности правил на основе алгоритмов роевого интеллекта» зарегистрировано ФСИС РФ в Реестре программ для ЭВМ, свидетельство № 2018616447 от 01.06.2018.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для повышения энергоэффективности генерирующих потребителей с возобновляемыми источниками энергии в концепции Smart Grid целесообразно строить управляющую систему путем решения задачи оптимального управления в недетерминированных условиях. В работе задача оптимального управления была решена путем оптимизации правил, задающих управление ГП. В правилах не учитываются прогнозы собственного потребления и выработки генерирующего потребителя, а учитывается только его текущее состояние. Это снижает риск ошибки управления из-за неточностей прогно-

зов, что важно в условиях высокой зависимости выработки от труднопредсказуемой энергии ветра. Решение задачи оптимального управления позволяет ГП построить выгодную для себя политику взаимодействия с внешней электроэнергетической системой и соседними ГП.

2. Алгоритмы роевого интеллекта являются эффективным с точки зрения критерия оптимальности, скорости работы и сходимости к оптимальному решению. Все три используемых алгоритма (частиц, светлячков, пчел) дали одинаковые результаты. Задача может быть решена с несколько меньшей (1...2 %) точностью и градиентными алгоритмами, но это требует многократных запусков из-за попадания в локальные экстремумы, и поэтому глобальное решение задачи даже при многократных запусках не было найдено. Кроме того, показано, что неточность определения критерия оптимальности может исказить влияние различных параметров ГП на его потенциальную экономическую эффективность.

3. Емкость накопителя ГП является одним из важнейших факторов, позволяющих повышать его экономическую эффективность. Чем выше емкость накопителя (до некоторого предела, который определяется оптимизацией и моделированием), тем больше у ГП пространства для маневра, то есть больше вариантов и возможностей для выгодного обмена электроэнергий в Smart Grid системе с двусторонними потоками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манусов В.З., Хасанзода Н. Оптимизация энергоэффективности ветровых ресурсов Дальнего Востока на основе алгоритма роевого интеллекта // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2018. – № 19–21. – С. 12–22.
2. Optimal scheduling for coordination renewable energy and electric vehicles consumption / D.L. Ha, H. Guillou, N. Martin, V.D. Cung, M. Jacomino // 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2–5 November, 2015. – Miami, FL, 2015. – P. 319–324.
3. Load shedding and smart-direct load control using internet of things in smart grid demand response management / H. Mortaji, S. Siew, M. Moghavvemi, H. Almurib // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2017. – Vol. 53, iss. 6. – P. 5155–5163.
4. Shah P., Hussain I., Singh B. Multi-resonant FLL based control algorithm for grid interfaced multifunctional solar energy conversion system // IET Science, Measurement and Technology. – 2018. – Vol. 12, iss. 1. – P. 49–62.
5. Сокольникова Т.В., Суслов К.В., Ломбарди Л. Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 10 (105). – С. 206–211.
6. Манусов В.З., Хасанзода Н., Бобоев Ш.А. Исследование оптимальных режимов интеллектуальных сетей с двухсторонним потоком энергии // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3. – С. 175–190.
7. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Советское радио, 1980. – 232 с.
8. Ногин В.Д. Введение в оптимальное управление: учебно-методическое пособие. – СПб.: ИУТАС, 2008. – 92 с.
9. Манусов В.З., Хасанзода Н., Матренин П.В. Повышение энергоэффективности ветроэнергетических установок на основе роевого интеллекта // Новое в российской энергетике. – 2018. – № 10. – С. 36–43.
10. Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications / ed. by X.-Sh. Yang et al. – Amsterdam; Boston: Elsevier, 2013. – 450 p.

11. *Матренин П.В.* Разработка адаптивных алгоритмов роевого интеллекта в проектировании и управлении техническими системами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Томск, 2018. – 197 с.

12. *Матренин, П.В., Манусов В.З.* Адаптивный алгоритм роя частиц в задачах оперативного планирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 4 (142). – С. 11–15.

13. *Глебов Н.И., Кочетов Ю.А., Плясунов А.В.* Методы оптимизации: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000. – 105 с.

Манусов Вадим Зиновьевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – применение интеллектуальных информационных технологий и методов искусственного интеллекта для анализа, планирования и оптимизации электроэнергетических систем. Имеет более 200 публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: manusov36@mail.ru

Матренин Павел Викторович, кандидат технических наук, ассистент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – применение методов искусственного интеллекта для проектирования и оптимизации технических систем. Имеет 40 публикаций. E-mail: pavel.matrenin@gmail.com

Хасанзода Насрулло, аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – исследование режимов интеллектуальных сетей с возобновляемыми источниками энергии и управления ими на основе методов искусственного интеллекта. Имеет 20 публикаций. E-mail: nasrullo-5445@mail.ru

Manusov Vadim Zinovevich, D.Sc. (Eng.), professor at the Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests include application of intelligent information technologies and methods of artificial intelligence for analysis, planning and optimization of electric power systems. He is the author of 220 scientific papers including 5 monographs. E-mail: manusov36@mail.ru.

Matrenin Pavel Victorovich, PhD (Eng.), an assistant lecturer at the Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on the application of artificial intelligence methods for designing and optimizing engineering systems. He has published 40 research papers. E-mail: pavel.matrenin@gmail.com

Khasanzoda Nasrullo, a postgraduate student at the Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests include study of intelligent grids with renewable energy sources and their management based on artificial intelligence methods. He is the author of 20 scientific papers. E-mail: nasrullo-5445@mail.ru.

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-115-134

Application of swarm intelligence algorithms to energy management by a generating consumer with renewable energy sources*V.Z. MANUSOV^a, P.V. MATRENIN^b, N. KHASANZODA^c

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a manusov36@mail.ru ^b pavel.matrenin@gmail.com ^c nasrullo-5445@mail.ru**Abstract**

The paper considers the problem of optimal control of a generating consumer with renewable energy sources in a smart grid with distributed generation and two-way energy flows. It is shown that management must be performed in non-deterministic conditions due to the impossibility of accurate forecasting of power generation by renewable sources. To control the generating consumer, a model of control action selection based on a set of logical rules is used. Therefore, it's necessary to solve the structural-parametric optimization of the order of the rules list and the values of rules numerical parameters. In contrast to the existing studies, the problem of optimal control is considered from the point of view of a separate generating consumer, and not of the entire distributed system, as well as control without an explicit use of forecasts of energy production and consumption. The solution of this optimization problem is performed by three swarm intelligence algorithms (Particle Swarm Optimization, Bee Algorithm, Firefly Optimization) and by the gradient descent algorithm. Computational experiments were carried out for models of wind energy systems on Russky Island and Popov Island (Far East). The results obtained showed a high effectiveness of the swarm intelligence algorithms that demonstrated a reliable and fast convergence to the global extremum of the optimization problem under different scenarios and parameters of generating consumers. Also, the paper carries out the analysis of the influence of the capacity of the batteries of the generating consumer on the variability of its actions. The variability, in turn, affects an increase in the generating consumer benefits from the interchange of energy with the external global power system and neighboring generating consumers. The paper gives the rationale for the economic benefits of increasing the capacity of energy storage to a certain limit, which can be determined by the proposed method.

Keywords: generating consumer, swarm intelligence, structural-parametric optimization, optimal control, renewable energy, smart grid

REFERENCES

1. Manusov V.Z., Khasanzoda N. Optimizatsiya energoeffektivnosti vetrovykh resursov Dal'nego Vostoka na osnove algoritma roevogo intellekta [Optimization of the Far East wind resources energy efficiency on the basis of the swarm intelligence algorithm]. *Alternativnaya energetika i ekologiya (ISJAE) – Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018, no. 19–21, pp. 12–22. (In Russian).
2. Ha D.L., Guillou H., Martin N., Cung V.D., Jacomino M. Optimal scheduling for coordination renewable energy and electric vehicles consumption. *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 2–5 November, 2015, Miami, FL, pp. 319–324.
3. Mortaji H., Siew S., Moghavvemi M., Almurib H. Load shedding and smart-direct load control using internet of things in smart grid demand response management. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, iss. 6, pp. 5155–5163.
4. Shah P., Hussain I., Singh B. Multi-resonant FLL based control algorithm for grid interfaced multifunctional solar energy conversion system. *IET Science, Measurement and Technology*, 2018, vol. 12, iss. 1, pp. 49–62.

* Received 28 February 2019.

5. Sokolnikova, T.V., Suslov K.V., Lombardi, L. Opredelenie optimal'nykh parametrov nakopitelya dlya integratsii vozobnovlyаемых источников энергии v izolirovannykh energosistemakh s aktivnymi potrebitelyami [Determining optimal energy storage parameters for renewable energy sources integration in isolated energy system with active consumers]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, vol. 10 (105), pp. 206–211.
6. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Boboev Sh.A. Issledovanie optimal'nykh rezhimov intellektual'nykh setei s dvukhstoronnim potokom energii [Research on optimal modes of intelligent networks with a two-way energy flow]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3, pp. 175–190.
7. Rastrigin L.A. *Sovremennye printsipy upravleniya slozhnymi ob"ektami* [Modern principles of management of complex objects]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 232 p.
8. Negin V.D. *Vvedenie v optimal'noe upravlenie* [Introduction to optimal control]. St. Petersburg, YuTAS Publ., 2008. 92 p.
9. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Matrenin P.V. Povyshenie energoeffektivnosti vetroenergeticheskikh ustanovok na osnove roevogo intellekta [Improving the energy efficiency of wind power plants on based swarm intelligence]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike – New in the Russian Electrical Power-Engineering*, 2018, no. 10, pp. 36–43.
10. Yang X., etc., eds. *Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications*. Amsterdam, Boston, Elsevier, 2013. 450 p.
11. Matrenin P.V. *Razrabotka adaptivnykh algoritmov roevogo intellekta v proektirovanii i upravlenii tekhnicheskimi sistemami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Adaptive swarm intelligence algorithms in design and control of technical systems. PhD eng. sci. diss.]. Tomsk, 2018. 197 p.
12. Matrenin P.V., Manusov V.Z. [Adaptive Particle Swarm Optimization for the Operational Scheduling Problem] // *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii – Herald of computer and information technologies*, 2016, Vol. 4 (142), P. 11–15. (In Russian).
13. Glebov N.I., Kochetov Yu.A., Plyasunov A.V. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Novosibirsk, NSU Publ., 2000. 105 c.

Для цитирования:

Манусов В.З., Матренин П.В., Хасанзода Н. Применение алгоритмов роевого интеллекта в управлении генерирующим потребителем с возобновляемыми источниками энергии // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 115–134. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-115-134.

For citation:

Manusov V.Z., Matrenin P.V., Khasanzoda N. Primenenie algoritmov roevogo intellekta v upravlenii generiruyushchim potrebitелеm s vozobnovlyаемыми источниками энергии [Application of swarm intelligence algorithms to energy management by a generating consumer with renewable energy sources]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 115–134. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-115-134.

УДК 621.313.17

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-135-148

Энергопреобразование ненасыщенного электромагнитного двигателя при отрыве якоря внешними силами*

В.Ю. НЕЙМАН

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

nv.nstu@ngs.ru

Для оценки эффективности преобразования энергии механических колебаний в системах с автономным энергоснабжением рассматривается возможность применения линейных генераторов, созданных на основе электромагнитных двигателей возвратно-поступательного действия. В качестве объекта для исследований выступает однокатушечный электромагнитный двигатель постоянного тока, функционирующий в генераторном режиме. В работе рассмотрены вопросы энергопреобразования ненасыщенного электромагнитного двигателя при отрыве якоря внешними силами. В основу анализа при получении энергетических соотношений положен закон сохранения энергии с возможностью получения формул для энергии и сил, присутствующих в статическом режиме. Получены расчетные соотношения, характеризующие процесс движения якоря под действием внешней механической силы, сопровождаемый генераторным эффектом и частичной передачей энергии источнику. Для случая линейной среды установлена предпочтительность в использовании элементарных магнитных циклов, характеризующих режимы энергопреобразования и передачу энергии при движении якоря под действием вынуждающей внешней силы. Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании линейных генераторов с электромагнитным возбуждением для повышения эффективности их использования в системах с автономным энергоснабжением.

Ключевые слова: автономное энергоснабжение, линейный генератор, электромагнитный двигатель, закон сохранения энергии, энергопреобразование, элементарный магнитный цикл

ВВЕДЕНИЕ

В современных системах автономного энергоснабжения для преобразования энергии механических колебаний применяются линейные электрические генераторы малой и средней мощности [1–5].

Перспективность их использования определяется высокой эффективностью, надежностью, простотой конструкции и минимальными затратами на обслуживание. Из всего многообразия различных видов линейных генерато-

* *Статья получена 27 марта 2019 г.*

ров особенно выделяются магнитоэлектрические генераторы линейного или возвратно-поступательного действия, использующие для возбуждения магнитного поля в индукторе постоянные магниты на основе редкоземельных материалов [6–12]. Использование в конструкции постоянных магнитов в некоторой степени позволяет улучшить массогабаритные показатели генератора [13].

Если массогабаритные показатели рассматривать как второстепенные, то определенный практический интерес могут представлять линейные генераторы с электромагнитным возбуждением, отличающиеся еще более простой конструкцией, меньшей стоимостью при производстве и возможностью регулирования в широких пределах потока возбуждения [14]. Однако ввиду повышенных массогабаритных показателей и малой их изученности широкого практического применения они не получили.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ существующих технических решений показал, что в самом простейшем варианте исполнения в роли такого генератора может выступать электромагнитный двигатель (ЭМД) или обычный электромагнит (ЭМ) постоянного тока, в которых отрыв якоря (сердечника) внешними силами сопровождается генераторным эффектом. При этом часть энергии внешнего источника силы переходит в магнитную энергию преобразователя и его цепи питания [15].

Машины и механизмы, созданные на базе ЭМД и ЭМ, с успехом применяются сегодня в различных отраслях промышленности [16–20]. Также совершенствуются методы по их расчету и проектированию [21–29].

Пример подобного ЭМД, используемого в общей структуре линейного генератора с электромагнитным возбуждением, и обозначения основных элементов его конструкции приведены на рис. 1.

При отрыве якоря работа, совершаемая внешними силами, преобладает над электромагнитной силой и сопровождается увеличением воздушного рабочего зазора.

По аналогии с двигательным режимом генераторный режим также характеризуется переходной динамической характеристикой намагничивания, которая формируется из совокупности промежуточных элементарных магнитных циклов в координатах «потокосцепление – ток» $\psi = f(i)$ (рис. 2) [30, 31].

Основными показателями, способствующими такому разделению, являются знаки приращения потокосцепления [32]. Можно заключить, что процессы, происходящие с уменьшением потокосцепления ($d\psi < 0$), сопровождаются передачей энергии в сеть. Напротив, процессы, происходящие с увеличением потокосцепления ($d\psi > 0$), сопровождаются потреблением энергии из сети.

Увеличение рабочего воздушного зазора в соответствии с направлением указателя в виде стрелки на рис. 2 свидетельствует о том, что электромагнитные силы совершают отрицательную работу, связанную с перемещением якоря и преодолением электромагнитной силы. Это означает, что совершает-

ся работа внешних сил по преодолению электромагнитного тягового усилия (генераторный режим).

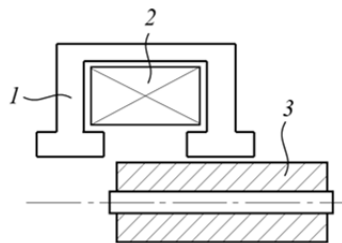


Рис. 1. Линейный генератор на примере ЭМД:

1 – магнитопровод; 2 – катушка возбуждения; 3 – якорь

Fig. 1. A linear generator on the example of EMM:

1 is a magnetic conductor; 2 is an excitation coil; 3 is the armature

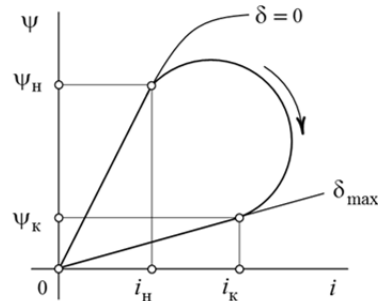


Рис. 2. Переходная динамическая характеристика намагничивания:

ψ_H, i_H – начальные значения потокосцепления и тока; ψ_K, i_K – конечные значения потокосцепления и тока

Fig. 2. The transient dynamic magnetization characteristic:

ψ_b, i_b are initial values of flux linkage and current; ψ_e, i_e are final values of flux linkage and current

Также по аналогии с двигательным режимом всё многообразие процессов энергопреобразования, обладающих общими свойствами, можно разделить на несколько групп (режимов), характеризующих эффект генерации при отрыве якоря (рис. 3): 1) при одновременном увеличении тока и потокосцепления (рис. 3, а); 2) при увеличивающемся токе и постоянном потокосцеплении (рис. 3, б); 3) при увеличивающемся токе и уменьшающемся потокосцеплении (рис. 3, в); 4) при постоянном токе и уменьшающемся потокосцеплении (рис. 3, г); 5) при одновременном уменьшении тока и потокосцепления (рис. 3, д).

В настоящей работе рассматриваются вопросы энергопреобразования ненасыщенного ЭМД постоянного тока, сопровождаемые генераторным эффектом при отрыве якоря внешними силами.

При решении этих вопросов потерями энергии на активных сопротивлениях, вихревыми токами и явлением гистерезиса пренебрегаем. Также полагаем, что энергопреобразование рассматривается для случая линейной среды и определяется только переходной кривой динамической характеристики намагничивания, которая формируется из совокупности элементарных магнитных циклов [30]. Будем считать, что каждый из этих циклов характеризует процесс движения якоря под действием внешней силы. В конкретном случае электромагнитные силы совершают только отрицательную работу по перемещению якоря, так как внешняя механическая сила преобладает над электромагнитной силой, что соответствует генераторному режиму.

При выводе энергетических соотношений воспользуемся законом сохранения энергии с возможностью получения формул для энергии и сил, присущих статическим режимам [33, 34]. Аналогичный подход применялся авто-

рами работы [35, 36] при выводе энергетических соотношений применительно к двигательному режиму.

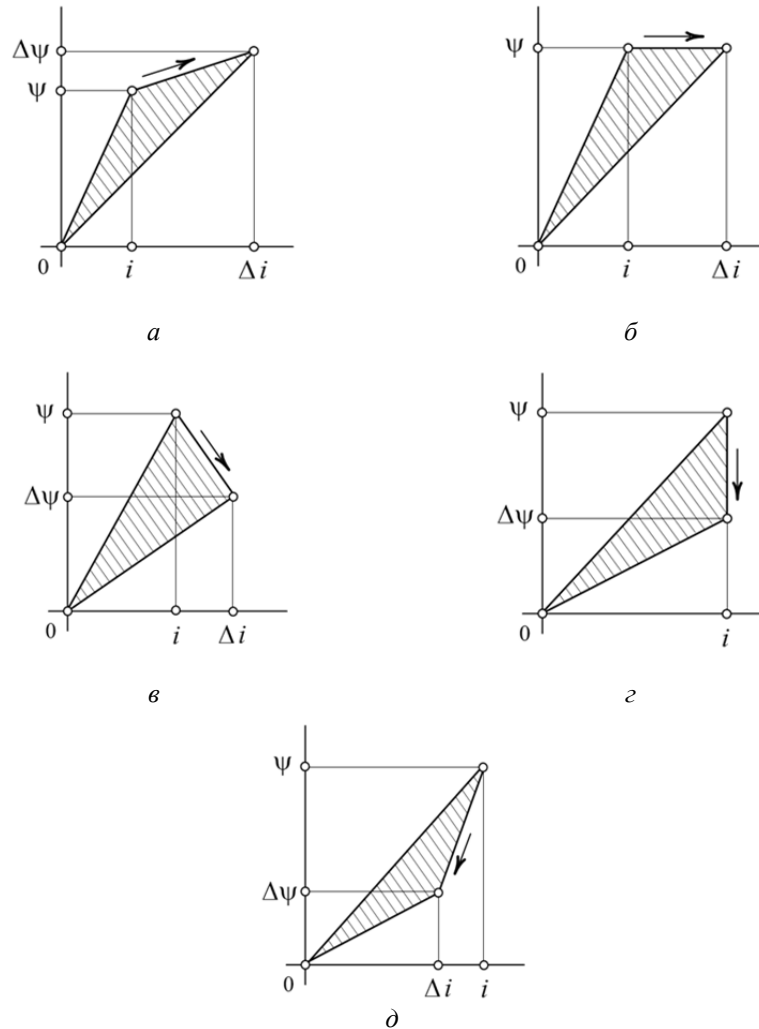


Рис. 3. Элементарные магнитные циклы

Fig. 3. Elementary magnetic cycles

2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Очевидно, что все процессы энергопреобразования (рис. 3), протекающие с уменьшением потокоцепления ($d\psi < 0$), сопровождаются отдачей энергии источнику посредством питающей цепи ЭМД. За время dt источнику возвращается энергия $dW_{\text{эм}}$ за вычетом дополнительных тепловых потерь dW_Q на активном сопротивлении:

$$dW_{\text{эм}} - dW_Q = dW_{\text{эл}}.$$

Энергия движения $dA_{\text{мех}}$ при отрыве якоря внешними силами переходит в энергию магнитного поля. Соотношение между магнитной и электромагнитной энергиями

$$dA_{\text{мех}} + dW_{\text{м}} = dW_{\text{эм}}.$$

Дифференциал энергии электромагнитного поля, вызванного уменьшением потокосцепления и изменением знака электродвижущей силы:

$$dW_{\text{эм}} = -eidt = -id\psi(i, x) = -i \frac{\partial \psi}{\partial i} di - i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx.$$

В первом режиме энергопреобразования (рис. 3, а) при отрыве якоря одновременно увеличиваются потокосцепление и ток. Возможность передачи энергии источнику здесь исключается ($d\psi > 0$). Характерной особенностью режима является потребление электромагнитной энергии от источника питания.

Работа внешних сил и энергия, потребляемая от источника за время движения якоря, затрачиваются на изменение энергии магнитного поля, тем самым пополняя существующий запас магнитной энергии.

Дифференциал энергии магнитного поля

$$\begin{aligned} dW_{\text{м1}} = \Delta W_{\text{м1}} &= \frac{1}{2}(\psi + \Delta\psi)(i + \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi = \frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i = \\ &= \frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di = \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (1)$$

Элементарная работа, вызванная внешним воздействием, с учтенным изменением знака электродвижущей силы

$$\begin{aligned} dA_{\text{мех1}} = dW_{\text{эм}} - dW_{\text{м1}} &= \\ &= i \frac{\partial \psi}{\partial i} di + i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di = \\ &= \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di = \frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (2)$$

Усиление, возникающее при отрыве якоря внешними силами:

$$F_1 = \frac{dA_{\text{мех1}}}{dx} = \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial i} \frac{di}{dx} + \frac{1}{2} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx} = \frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}. \quad (3)$$

Для второго режима энергопреобразования (рис. 3, б) энергия источнику не передается и не потребляется от источника, поскольку $dW_{\text{эм}} = id\psi = 0$ ($\psi = \text{const}$).

Дифференциал энергии магнитного поля

$$dW_{\text{м2}} = \Delta W_{\text{м2}} = \frac{1}{2}\psi(i + \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi = \frac{1}{2}\psi\Delta i = \frac{1}{2}\psi di. \quad (4)$$

Работа внешних сил затрачивается только на изменение энергии магнитного поля, запасаемого системой в виде магнитной энергии, и выражается зависимостью

$$dA_{\text{мех}} = -dW_{\text{м2}} = -\frac{1}{2}\psi di. \quad (5)$$

Усилие при отрыве якоря внешними силами

$$F_2 = \frac{dA_{\text{мех2}}}{dx} = -\frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}. \quad (6)$$

В третьем режиме энергопреобразования (рис. 3, в) дифференциал энергии магнитного поля

$$\begin{aligned} dW_{\text{м3}} = \Delta W_{\text{м3}} &= \frac{1}{2}(\psi - \Delta\psi)(i + \Delta i) - \frac{1}{2}\psi i = -\frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i = \\ &= -\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (7)$$

Элементарная работа внешнего источника механической силы с учетом изменением знака электромагнитной энергии

$$\begin{aligned} dA_{\text{мех3}} = dW_{\text{эм}} - dW_{\text{м3}} &= \\ &= -i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di = \\ &= -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di = -\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (8)$$

Усилие, возникающее при отрыве якоря внешними силами:

$$F_3 = \frac{dA_{\text{мех3}}}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dx} - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}. \quad (9)$$

В данном режиме энергопреобразования энергия, переходящая источнику, может превышать затраты энергии на работу внешних сил или быть значительно меньшей затрат этой энергии, что в существенной степени зависит от значения дифференциала магнитной энергии $dW_{\text{м3}}$. Например, в случае выполнения условия $id\psi = \psi di$ приращение энергии магнитного поля полностью отсутствует ($dW_{\text{м3}} = 0$), при этом энергия, переходящая источнику, в точности соответствует энергии, затраченной на работу внешних сил при отрыве якоря.

В четвертом режиме энергопреобразования (рис. 3, г) энергия, поступающая в систему от внешнего силового воздействия, находится в равных долях с энергией, приходящейся на изменение энергии магнитного поля, т. е. всегда выдерживается условие

$$dA_{\text{мех4}} = -dW_{\text{м4}}.$$

Генераторный эффект поддерживается как за счет убывания энергии магнитного поля ($d\psi < 0$), так и за счет энергии внешней силы при отрыве якоря.

Дифференциал энергии магнитного поля (рис. 3, з) выражается зависимостью

$$\begin{aligned} dW_{M4} = \Delta W_{M4} &= \frac{1}{2}(\psi - \Delta\psi)i - \frac{1}{2}i\psi = -\frac{1}{2}i\Delta\psi = -\frac{1}{2}id\psi = \\ &= -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx. \end{aligned} \quad (10)$$

Электродвижущая сила также меняет свой знак. Элементарная работа по перемещению якоря, вызванная внешним воздействием:

$$\begin{aligned} dA_{Mех4} = dW_{эм} - dW_{M4} &= -i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx = \\ &= -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx = -\frac{1}{2}id\psi. \end{aligned} \quad (11)$$

Соответствующее режиму усилие при отрыве якоря

$$F_4 = \frac{dA_{Mех4}}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dx} - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx}. \quad (12)$$

Для пятого режима энергопреобразования (рис. 3, д) дифференциал энергии магнитного поля будет выражаться зависимостью

$$\begin{aligned} dW_{M5} = \Delta W_{M5} &= \frac{1}{2}(\psi - \Delta\psi)(i - \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi = -\frac{1}{2}i\Delta\psi - \frac{1}{2}\psi\Delta i = \\ &= -\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (13)$$

Элементарная работа, вызванная внешним силовым воздействием:

$$\begin{aligned} dA_{Mех5} = dW_{эм} - dW_{M5} &= \\ &= -i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}\psi di = \\ &= -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}\psi di = -\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (14)$$

Возникающее усилие при отрыве якоря

$$F_5 = \frac{dA_{Mех5}}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dx} - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} + \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} + \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}. \quad (15)$$

Особенность режима заключается в том, что источнику в форме электрической энергии возвращается энергия, которая может превышать работу внешних сил, и связано это с процессом убывания тока.

Выполненный анализ режимов энергопреобразования ненасыщенного ЭМД, сопровождаемых генераторным эффектом при отрыве якоря внешними силами, в соответствии с полученными выражениями (1)–(15) представлен в таблице.

Параметры режимов энергопреобразования ЭМД

Parameters of EMM energy conversion modes

Режим	Дифференциал энергии магнитного поля, dW_M	Элементарная работа внешних сил, $dA_{\text{мех}}$	Средняя сила, действующая на якорь, F
1	$\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di$	$\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di$	$\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}$
2	$\frac{1}{2}\psi di$	$-\frac{1}{2}\psi di$	$-\frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}$
3	$-\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di$	$-\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di$	$-\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}$
4	$-\frac{1}{2}id\psi$	$-\frac{1}{2}id\psi$	$-\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx}$
5	$-\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di$	$-\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di$	$-\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} + \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации генераторного эффекта с передачей части энергии в цепь питания реальный интерес может представлять переходная динамическая характеристика намагничивания, в основе формирования которой используются элементарные магнитные циклы при увеличивающемся токе и уменьшающемся потокоцеплении (рис. 3, в), при постоянном токе и уменьшающемся потокоцеплении (рис. 3, г), а также при одновременном уменьшении тока и потокоцепления (рис. 3, д).

Дальнейшее повышение эффективности процесса энергопреобразования непосредственно связано с необходимостью реализации указанной переходной характеристики намагничивания на интервале движения якоря под действием вынуждающей внешней силы, что является очевидным только с использованием специальных средств регулирования.

Эффект генерации и передачи энергии по цепям питания при отрыве якоря внешними силами очевиден и в случае нелинейной среды. Также для случая нелинейной среды сохраняется предпочтительность в использовании магнитных циклов или их комбинаций, представленных на рис. 3, в–д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Духанин В.И., Кецарис А.А.* Анализ рабочего процесса линейного генератора с возвратно-поступательным движением // Известия МГТУ МАМИ. – 2012. – Т. 1, № 2 (14). – С. 104–110.
2. Автономные системы электропитания на основе синхронных генераторов возвратно-поступательного движения / В. Климов, А. Демьянов, И. Царьков, С. Климова // Силовая электроника. – 2016. – Т. 4, № 61. – С. 49–54.
3. *Сафонов В.А., Белецкий И.Л., Кузнецов П.Н.* Термомеханический двигатель с линейным генератором, работающий по циклу Стирлинга // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 4. – С. 60–62.
4. *Нуен Ф.Т., Крамаров А.С.* Линейные электрические генераторы возвратно-поступательного движения для энергосиловых установок на основе двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем. Состояние вопроса // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 27–37.
5. *Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.* Линейный синхронный генератор мощностью 30 кВт для волновой энергетики // Электротехника. – 2017. – № 2. – С. 8–14.
6. Линейные магнитокоммутационные генераторы для систем электропитания автономных объектов / В.Е. Высоцкий, А.П. Синицин, В.С. Пенетов, Е.С. Юзефпольская // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 26–31.
7. *Соколова Е.М., Моцинский Ю.А.* Линейные генераторы с постоянными магнитами возвратно-поступательного движения // Электротехника. – 2018. – № 9. – С. 68–73.
8. Перспективы применения синхронных генераторов с постоянными магнитами и возвратно-поступательным движением индуктора / Г.С. Тамоян, М.В. Афонин, Е.М. Соколова, Тег Ту Мью // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 54–56.
9. *Кондратенко И.П., Рацеккин А.П., Ваццишин Д.Д.* Динамическая модель линейного генератора с постоянными магнитами для преобразования энергии волн // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 113–114.
10. *Бартедьев О.В., Морозкина М.В.* Исследование эффективности линейного генератора, работающего на зарядное устройство // Электротехника. – 1992. – № 8–9. – С. 61–63.
11. *Соколова Е.М., Моцинский Ю.А., Шумов К.В.* Линейный генератор с постоянными магнитами в схеме электрического амортизатора // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 2 (39). – С. 70–74.
12. *Хитерер М.Я., Овчинников И.Е.* Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: Корона принт, 2004. – 368 с.
13. *Сергеенкова Е.В., Федин М.А.* Исследование линейного синхронного генератора с постоянными магнитами, преобразующего энергию колебаний в электрическую // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 13–16.
14. *Менжинский А.Б., Малашин А.Н., Суходолов Ю.В.* Разработка и анализ математических моделей генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 2. – С. 118–128.
15. *Ивашин В.В., Плотников С.Б.* Энергетические соотношения электромагнита постоянного тока при отрыве якоря внешними силами // Силовые полупроводниковые и импульсные электромеханические преобразовательные устройства / под общ. ред. В.В. Ивашина. – Куйбышев, 1976. – С. 12–16.
16. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.
17. *Нейман В.Ю., Петрова А.А.* Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
18. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
19. *Нейман В.Ю.* Режимы форсированного аккумулярования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Научный вестник НГТУ. – 2003. – № 1. – С. 105–112.

20. Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного вибросточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
21. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310–313.
22. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 57–62.
23. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
24. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.
25. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бояка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
26. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.
27. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.
28. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 1 (58). – С. 246–256.
29. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40.
30. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
31. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Исследование комбинированных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа // Импульсный электромагнитный привод / под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 38–44.
32. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука, 1987. – 160 с.
33. Шмитц Н., Новотный Д. Введение в электромеханику. – М.: Энергия, 1969. – 336 с.
34. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
35. Малинин В.И., Ряшенцев А.Н., Толстик А.И. Оценка динамического КПД электромагнита с ненасыщенной магнитной системой // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1989. – № 9. – С. 86–90.
36. Малинин В.И., Ряшенцев А.Н., Толстик А.И. Предельный КПД электромагнита с линейной магнитной системой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1991. – № 4. – С. 72–76.

Нейман Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовые электромагнитные импульсные системы. Автор более 200 научных публикаций. E-mail: nv.nstu@ngs.ru.

Neyman Vladimir Yurievich, D.Sc. (Eng.), professor, head of the department of theoretical fundamentals of electrical engineering in the Novosibirsk State Technical University. The field of his research is power electromagnetic pulse systems. He is the author of more than 200 publications. E-mail: nv.nstu@ngs.ru.

Energy Conversion in a non-saturated electromagnetic motor with the armature detached by external forces*

V. Yu. NEYMAN

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

nv.nstu@ngs.ru

Abstract

The effectiveness of mechanical oscillation energy conversion is estimated in systems with self-contained power supplies when linear generators based on reciprocated electromagnetic motors are applied. The research subject is a single-coil dc electromagnetic motor operating in the generator mode. The paper considers the non-saturated electromagnetic motor energy conversion when the armature is detached by external forces. Expressions for the energy and forces for static modes have been derived from the energy conservation law. The formulas have been obtained for the armature motion caused by the external mechanical force when the “generator” effect and partial energy transmission to the source take place. If the medium is linear, the elementary magnetic cycles describing energy conversion modes and energy transmission when the armature is moved by the external force are preferable. The results obtained should be taken into account when linear generators with electromagnetic excitation are designed as they help to increase the linear generator effectiveness in systems with self-contained power supplies.

Keywords: self-contained power supply, linear generator, electromagnetic motor, energy conservation law, energy conversion, elementary magnetic cycle

REFERENCES

1. Dukhanin V.I., Ketsaris A.A. Analiz rabocheho protsessa lineinogo generatora s vozvratno-postupatel'nym dvizheniem [Analysis of the workflow of linear generator of reciprocating motion type]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI – News of Moscow State Technical University MAMI*, 2012, vol. 1, no. 2 (14), pp. 104–110.
2. Klimov V., Dem'yanov A., Tsar'kov I., Klimova S. Avtonomnye sistemy elektropitaniya na osnove sinkhronnykh generatorov vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya [Autonomous power supply systems based on synchronous generators of reciprocating motion]. *Silovaya elek-tronika – Power electronics*, 2016, vol. 4, no. 61, pp. 49–54.
3. Safonov V.A., Beletskii I.L., Kuznetsov P.N. Termomekhanicheskii dvigatel' s lineinym generatorom, rabotayushchii po tsiklu Stirlinga [Thermomechanical motor with linear generator, working on the Stirling cycle]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace Engineering and Technology*, 2014, no. 4, pp. 60–62.
4. Nguen F.T., Kramarov A.S. Lineinye elektricheskie generatory vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya dlya energosilovykh ustanovok na osnove dvigatelya vnutrennego sgoraniya so svobodnym porshnem. Sostoyanie voprosa [Linear electric generator of reciprocating motion for power-generating plants based on an internal-combustion engine with a free-piston. The state of the question]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 27–37. (In Russian).
5. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Lineinyi sinkhronnyi generator moshchnost'yu 30 kVt dlya volnvoi energetiki [30 kW linear synchronous generator for wave power]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 2, pp. 8–14. (In Russian).
6. Vysotskii V.E., Sinitin A.P., Penetov V.S., Yuzefpol'skaya E.S. Lineinye magnetokomm-tatsionnye generatory dlya sistem elektropitaniya avtonomnykh ob"ektov [Linear magneto-switching

* Received 27 March 2019.

generators for power systems of autonomous objects]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2014, no. 5, pp. 26–31. (In Russian).

7. Sokolova E.M., Moshchinskii Yu.A. Lineinye generatory s postoyannymi magnitami vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya [Permanent magnet linear reciprocating linear oscillators]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2018, no. 9, pp. 68–73. (In Russian).

8. Tamoyan G.S., Afonin M.V., Sokolova E.M., Tet Tu M'yu. Perspektivy primeneniya sinkhronnykh generatorov s postoyannymi magnitami i vozvratno-postupatel'nym dvizheniem induktora [Prospects for the use of synchronous generators with permanent magnets and reciprocating inductor]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2007, no. 11, pp. 54–56.

9. Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P., Vashchishin D.D. Dinamicheskaya model' lineinogo generatora s postoyannymi magnitami dlya preobrazovaniya energii voln [A dynamic model of a linear permanent magnet generator for converting wave energy]. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical Electrodynamics*, 2012, no. 2, pp. 113–114.

10. Barten'ev O.V., Morozkina M.V. Issledovanie effektivnosti lineinogo generatora, rabotayushchego na zaryadnoe ustroystvo [Investigation of the efficiency of a linear generator operating on a charger]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1992, no. 8–9, pp. 61–63. (In Russian).

11. Sokolova E.M., Moshchinskii Yu.A., Shumov K.V. Lineinyi generator s postoyannymi magnitami v skheme elektricheskogo amortizatora [Permanent magnet linear oscillator in electrical shock absorber circuit]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы – Electrotechnical Systems and Complexes*, 2018, no. 2 (39), pp. 70–74.

12. Khiterer M.Ya., Ovchinnikov I.E. *Sinkhronnye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya* [Synchronous electric reciprocating machines]. St. Petersburg, Corona print Publ., 2004. 368 p.

13. Sergeenkova E.V., Fedin M.A. Issledovanie lineinogo sinkhronnogo generatora s postoyannymi magnitami, preobrazuyushchego energiyu kolebanii v elektricheskuyu [The study of a linear synchronous generator with permanent magnets that converts the oscillation energy into electrical]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2011, no. 3, pp. 13–16. (In Russian).

14. Menzhinskii A.B., Malashin A.N., Sukhodolov Yu.V. Razrabotka i analiz matematicheskikh modelei generatorov lineinogo i vozvratno-postupatel'nogo tipov s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Development and analysis of mathematical models of linear and reciprocating types of generators with electromagnetic excitation]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG – Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 118–128.

15. Ivashin V.V., Plotnikov S.B. Energeticheskie sootnosheniya elektromagnita postoyannogo toka pri otryve yakorya vneshnimi silami [The energy ratio of the DC electromagnet at the anchor detachment by external forces]. *Silovye poluprovodnikovye i impul'snye elektromekhanicheskie preobrazovatel'nye ustroystva* [Power semiconductor and pulsed electromechanical converters]. Kuibyshev, 1976, pp. 12–16.

16. Aksyutin V.A., Neyman L.A., Neyman V.Yu., Skotnikov A.A. Pressovoe oborudovanie s lineinym elektromagnitnym privodom dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov udarnoi sborki i shtampovki melkikh izdelii [Press equipment with a linear electromagnetic drive for the mechanization of technological processes of shock assembly and stamping of small products]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 220–224.

17. Neyman V.Yu. Petrova A.A. Sravnenie sposobov forsirovki impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigatelei [Comparison of forcing methods of pulsed linear electromagnetic motors]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 47a–50.

18. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazatelei odnoobmotochnykh impul'snykh ustroystv s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Ways to improve the energy performance of single-winding pulsed devices with electromagnetic excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: science, technology, management*, 2010, no. 8, pp. 29–31.

19. Neyman V.Yu. Rezhimy forsirovannogo akkumulirovaniya magnitnoy energii v impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigatelyah [Modes of accelerated accumulation of magnetic energy in a pulse of electromagnetic linear motors]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 1, pp. 105–112.

20. Simonov B.F., Neiman V.Yu., Shabanov A.S. Impul'snyi lineinyi elektromagnitnyi privod dlya skvazhinogo vibroistochnika [Pulsed linear electromagnetic drive for downhole vibration source]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 2017, no. 1, pp. 118–126.

21. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. O metodike k vyboru tipa elektromagnita po znacheniyam konstruktivnogo faktora [About the method of choosing the type of electromagnet according to the values of the design factor]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2011, no. 2, pp. 310–313.

22. Malinin L.I., Neiman V.Yu. Opredelenie napryazheniya preobrazovaniya energii i elektromagnitnykh sil v elektromekhanicheskikh sistemakh [Determination of the voltage of energy conversion and electromagnetic forces in electromechanical systems]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2008, no. 6, pp. 57–62.

23. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyaniye sootnoshenii glavnykh razmerov elektromagnitov na znacheniya konstruktivnogo faktora i pokazatelya ekonomichnosti [The influence of the ratio of the main dimensions of the electromagnets on the values of the design factor and the indicator of efficiency]. *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy [Automated electromechanical systems]*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.

24. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primeneniye metoda provodimostei dlya ucheta sily odnostorononogo magnitnogo prityazheniya asimmetrichnogo elektromagnita [Application conductivities method to account for the strength of a unilateral asymmetric magnetic attraction of the electromagnet]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 214–218.

25. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovaniye dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsiyonnyim reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennyye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109, 110.

26. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Raschet pokazatelya ekonomichnosti silovogo elektromagnita postoyannogo toka s pomoshch'yu modelirovaniya magnitnogo polya [The calculation of the efficiency indicator of a DC power electromagnet using magnetic field simulation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transportation: science, technology, management*, 2008, no. 6, pp. 21–24.

27. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovaniye dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeystvii i nizkochastotnykh vibratsii [Simulation of dynamic processes in the electromagnetic energy converters for generating the force effects systems and low-frequency vibrations]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

28. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Povysheniye tochnosti analiticheskogo rascheta radial'nykh sil odnostorononogo magnitnogo prityazheniya nekoaksial'nykh elementov magnitoprovoda [Improving the accuracy of analytical calculation unilateral radial forces of magnetic attraction coaxial magnetic elements]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 1 (58), pp. 246–256.

29. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatel'nogo dvizheniya s uprugimi svyazyami [Mathematical model of electromechanical system with vibrational motion of elastic connections]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2015, no. 6, pp. 35–40.

30. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.

31. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Issledovaniye kombinirovannykh magnitnykh tsiklov elektromekhanicheskikh preobrazovatelyei elektromagnitnogo tipa [Research of combined magnetic cycles of electromechanical converters of electromagnetic type]. *Impul'snyi elektromagnitnyi privod [Pulsed electromagnetic drive]*. Novosibirsk, IGD SO AN SSSR Publ., 1988, pp. 38–44.

32. Ryashentsev N.P., Miroshnichenko A.N. *Vvedeniye v teoriyu energopreobrazovaniya elektro-magnitnykh mashin* [Introduction to the theory of energy conversion of electromagnetic machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 160 p.

33. Shmitts N., Novotnyi D. *Vvedeniye v elektromekhaniku* [Introduction to electromechanics]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 336 p.

34. Chunikhin A.A. *Elektricheskkiye apparaty* [Electrical apparatus]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 720 p.

35. Malinin V.I., Ryashentsev A.N., Tolstik A.I. Otsenka dinamicheskogo KPD elektromagnita s nenasyshchennoi magnitnoi sistemoi [Evaluation of the dynamic efficiency of an electromagnet with an unsaturated magnetic system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 1989, no. 9, pp. 86–90. (In Russian).

36. Malinin V.I., Ryashentsev A.N., Tolstik A.I. Predel'nyi KPD elektromagnita s lineinoi magnitnoi sistemoi [The ultimate efficiency of an electromagnet with a linear magnetic system]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 1991, no. 4, pp. 72–76.

Для цитирования:

Нейман В.Ю. Энергопреобразование ненасыщенного электромагнитного двигателя при отрыве якоря внешними силами // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 135–148. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-135-148.

For citation:

Neyman V.Yu. Energopreobrazovanie nenasyshchennogo elektromagnitnogo dvigatelya pri otrывe yakorya vneshnimi silami [Energy conversion in a non-saturated electromagnetic motor with the armature detached by external forces]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 135–148. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-135-148.

УДК 621.316.72

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-149-168

**Повышение качества
краткосрочного прогнозирования
электропотребления группы точек поставки
электроэнергии сельхозпроизводителей
с помощью инструментов машинного обучения ***

С.О. ХОМУТОВ^а, Н.А. СЕРЕБРЯКОВ^б

656038, РФ, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

^а homutov.so@yandex.ru ^б na_serebryakov@altke.ru

В настоящее время проблема прогнозирования потребления электроэнергии стала значительно актуальнее. От точности краткосрочного прогноза электропотребления зависят как финансовые результаты участников оптового рынка электроэнергии и мощности, так и надежность функционирования электроэнергетической системы. Для прогнозирования временного ряда почасового потребления электроэнергии с высокой точностью необходимо учитывать множество влияющих факторов. Поэтому данная задача относится к слабо формализуемым. Современный уровень развития информационных технологий позволяет использовать искусственные нейронные сети (ИНС) для решения подобных задач.

Настоящая статья посвящена проблеме повышения качества краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления группы точек поставки электроэнергии гарантирующего поставщика, включающих крупных сельхозпроизводителей, с помощью ИНС. Рассмотрены вопросы выбора парадигмы обучения, оптимальной архитектуры и алгоритма обучения нейронной сети. Определено оптимальное количество и размер скрытых слоев многослойного персептрона с помощью правила геометрической пирамиды. Исследована степень влияния скорости обучения и момента инерции на способность нейронной сети к поиску глобального минимума на поверхности ошибки в пространстве свободных параметров сети. Произведено теоретическое и практическое обоснование применения адаптивных в процессе обучения параметров скорости обучения и момента инерции. Рассмотрены основные техники борьбы с переобучением нейронных сетей. Проанализировано увеличение вычислительной эффективности ансамбля искусственных нейронных сетей по сравнению с единичной сетью большего размера. Рассмотрены вопросы кодировки факторного пространства, а также предварительной обработки и масштабирования исходных данных, предназначенных для обучения и тестирования нейронной сети. Рассмотрена практическая реализация ИНС различной архитектуры и конфигурации с помощью современных средств машинного обучения на языке программирования Python 3.6. Произведен сравнительный анализ точности прогнозирования почасовых объемов электропотребления группы точек поставки электроэнергии, полученного с помощью ИНС и метода экспертных оценок.

* Статья получена 12 апреля 2019 г.

Ключевые слова: прогнозирование, гиперпараметры, оптовый рынок электроэнергии и мощности, электрическая нагрузка, факторы, группа точек поставки электроэнергии, искусственная нейронная сеть, парадигма обучения, алгоритм обучения, градиентный спуск, поверхность ошибки, глобальный минимум

ВВЕДЕНИЕ

Проблема краткосрочного прогнозирования электропотребления (short term load forecasting – STLF) стала значительно острее с появлением в России оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ). В настоящее время большая часть объемов электроэнергии торгуется на спотовых рынках: «рынок на сутки вперед» (PCB) и «балансирующий рынок» (БР). Согласно Правилам ОРЭМ, покупка электроэнергии на PCB предполагает прогнозирование собственного почасового потребления на следующие сутки. На основании прогнозов потребителей электроэнергии на ОРЭМ системный оператор планирует режим работы энергетической системы:

– загружает наиболее дешевую генерацию, которая удовлетворит спрос на электроэнергию;

– выбирает оптимальную схему электрических сетей, обеспечивая необходимую надежность работы энергосистемы при минимизации потерь электроэнергии в сетевом оборудовании.

Качественный прогноз объемов потребления электроэнергии «на сутки вперед» позволяет снизить потребление первичных энергоресурсов, таких как уголь, газ, мазут, за счет минимизации числа необоснованных пусков и остановов генерирующего оборудования. Таким образом, для обеспечения устойчивой работы электроэнергетической системы актуальна задача краткосрочного прогнозирования электропотребления с дискретностью 1 час [1].

Объемы отклонений фактического потребления электроэнергии от прогнозного торгуются на БР. Цена электроэнергии на БР складывается так, чтобы стимулировать потребителей придерживаться собственного прогноза: объемы превышения фактического потребления электроэнергии над плановым покупаются по более высокой цене, а объемы превышения планового потребления над фактическим продаются по более низкой цене. То есть торговля электроэнергией на «балансирующем рынке» влечет за собой убытки от упущенной выгоды для гарантирующих поставщиков.

Также величина отклонений фактического потребления от планового, зависящая от точности прогнозирования, влияет на размер стоимостного небаланса БР, распределяемого на всех покупателей на ОРЭМ, и в частности на гарантирующих поставщиков (ГП). В соответствии с действующим законодательством в сфере электроэнергетики ГП закладывают стоимость небаланса БР в цену электроэнергии для конечного потребителя на розничном рынке электроэнергии. Для потребителей ГП АО «Алтайкрайэнерго» за счет стоимостного небаланса БР цена на электроэнергию увеличивается на 2...3 %.

Переход к рыночным принципам взаимоотношений между потребителями и энергосистемой повышает требования к точности прогнозирования энергопотребления, увеличивает ответственность за решения, принятые на основе результатов прогнозирования. В условиях функционирования рынка электроэнергии точность прогнозов потребления существенно влияет на технологические и экономические показатели энергосистемы [2]. Реформа ми-

рового рынка электроэнергии заставляет энергетическую отрасль постепенно трансформироваться от монополии к конкуренции. Как участники рынка, каждый поставщик и потребитель хочет получить наибольшую выгоду от оборота электроэнергии [3].

Энергосбытовое предприятие является посредником между электростанциями, занимающимися выработкой электроэнергии, и потребителями [4]. В настоящее время большинство энергосбытовых компаний и ГП прогнозируют собственное почасовое потребление электроэнергии на РСВ с помощью интуитивных методов прогнозирования: метода экспертных оценок и метода исторических аналогий. В данном случае прогнозный суточный график электрической нагрузки (СГЭН) является продуктом логического мышления эксперта или группы экспертов, а также опыта работы с объектом прогнозирования. Однако данные методы не позволяют снизить ошибку STLF ниже определенного значения вследствие человеческого фактора. Формализация процесса прогнозирования является наиболее перспективным путем увеличения качества краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии. Наличие множества факторов, влияющих на временной ряд потребления электроэнергии ГТП сельхозпроизводителей, делает задачу STLF слабоформализуемой. На сегодняшний день разработано множество алгоритмов для анализа и прогнозирования временных рядов. В то же время ни один из них нельзя назвать универсальным. Большинство алгоритмов не отвечает требованию высокой точности прогнозирования в условиях постоянно изменяющейся конъюнктуры рынка электроэнергии.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие таких областей информационных технологий, как искусственный интеллект, системы обработки больших объемов данных (Big Data) и глубокое машинное обучение. Рассмотренные информационные технологии являются высокоэффективным инструментом для решения широкого перечня задач, которые относятся к слабоформализуемым или неформализуемым [5]. Вычислительная мощность среднестатистического персонального компьютера позволяет применять нейросетевые алгоритмы для краткосрочного прогнозирования временного ряда потребления электроэнергии. Операции над матричными данными, описывающие прохождение сигнала через нейронную сеть, на современном компьютере выполняются за считанные секунды. На основании исследований [1–4, 7, 16, 18] можно сделать вывод, что нейронные сети различной архитектуры позволяют выполнять краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии с необходимой точностью.

1. ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ, ПАРАДИГМЫ И АЛГОРИТМА ОБУЧЕНИЯ ИНС ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Проектирование нейронной сети, предназначенной для решения конкретной практической задачи, начинается с выбора парадигмы обучения. Существует две парадигмы обучения:

- обучение с учителем;
- обучение без учителя.

При обучении искусственной нейронной сети (ИНС) с учителем необходимо иметь статистическую базу с маркированными примерами. То есть для каждого входного сигнала имеется так называемый желаемый отклик сети. В процессе обучения свободные параметры ИНС настраиваются таким образом, чтобы получить на выходе сети отклик на входное воздействие, наиболее схожий в статистическом смысле с желаемым. В терминах теории искусственных нейронных сетей схожесть векторов фактического и желаемого отклика ИНС определяется функцией энергии ошибки:

$$\begin{cases} e(n) = d(n) - y(n), \\ E(n) = \frac{1}{2} e^2(n), \end{cases} \quad (1)$$

где $e(n)$ – сигнал абсолютной ошибки ИНС на шаге обучения n ; $d(n)$ – сигнал желаемого отклика ИНС; $y(n)$ – фактический отклик сети ИНС; $E(n)$ – функция энергии ошибки.

Целью обучения сети является минимизация функции энергии ошибки за наименьшее число итераций обучающего цикла n :

$$E(n) \rightarrow 0. \quad (2)$$

Парадигма обучения без учителя, то есть на основе самоорганизации, не предполагает наличие внешнего учителя. Для данного вида обучения нет необходимости в маркированных примерах вида вход–выход. Существует лишь независимая от задачи мера качества представления, которой ИНС должна научиться. Свободные параметры сети оптимизируются по отношению к этой мере.

Для решения задачи краткосрочного прогнозирования почасового потребления электроэнергии на РСВ выбирается парадигма обучения с учителем. Это объясняется тем, что при наличии базы статистических данных, которая содержит информацию о желаемом отклике, ИНС, обучаемые с учителем, показывают более высокие результаты по сравнению с нейронными сетями, обучаемыми на основе самоорганизации. В соответствии с Правилами ОРЭМ у каждого участника спотового рынка электроэнергии и мощности имеется обязанность по хранению данных о почасовом потреблении электроэнергии ГТП за последние 3,5 года. То есть энергосбытовые предприятия и гарантирующие поставщики обладают необходимым для качественного обучения ИНС объемом статистической информации.

После выбора парадигмы обучения можно переходить к выбору архитектуры нейронной сети, которая тесно связана с алгоритмом обучения. Поэтому определение оптимальной архитектуры ИНС производится параллельно с выбором алгоритма обучения.

В настоящее время разработано большое количество ИНС различной архитектуры. Для решения практических задач в основном используются нейронные сети прямого распространения, рекуррентные нейронные [6] сети и скрытые марковские сети [8]. ИНС прямого распространения сигнала отличаются отсутствием обратных связей, то есть информация об итоговом отклике сети не подается на вход сети. Практическое применение ИНС прямого распространения находят в решении практических задач распознавания обра-

зов, аппроксимации и прогнозирования временных рядов. Основная область применения рекуррентных нейронных сетей – это обработка текстовых данных, то есть анализ контекста и общей связи слов в тексте. Скрытые марковские нейронные сети в основном применяются для анализа и обработки естественной устной речи.

Нейронные сети прямого распространения подразделяются:

- на однослойные и многослойные перцептроны;
- машины опорных векторов;
- ИНС на основе радиальных базисных функций;
- сверточные ИНС.

Наиболее привлекательными являются многослойные перцептроны и сверточные ИНС, так как они хорошо зарекомендовали себя при решении схожих с STLTF практических задач классификации образов (распознавание рукописного текста (MNIST) и объектов на изображениях (CIFAR-10)). Нейросетевая классификация заключается в распознавании на основе входных данных закономерностей и в отнесении к одному из образов [9]. Однако ограничением применения сверточных ИНС является сложность представления входных данных сети, так как сверточные слои обрабатывают двух- и трехмерные массивы данных, в то время как статистические данные о фактическом потреблении электроэнергии и уровне основных влияющих факторов являются одномерным вектор-столбцом.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о том, что многослойный перцептрон является оптимальной архитектурой ИНС для решения задачи краткосрочного прогнозирования почасового потребления электроэнергии. Обучение многослойного перцептрона осуществляется с помощью алгоритма обратного распространения ошибки.

2. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ГИПЕРПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА

Нейронная сеть представляет собой сложные отношения между входами и выходами [10]. На рис. 1 представлена структурная схема многослойного перцептрона.

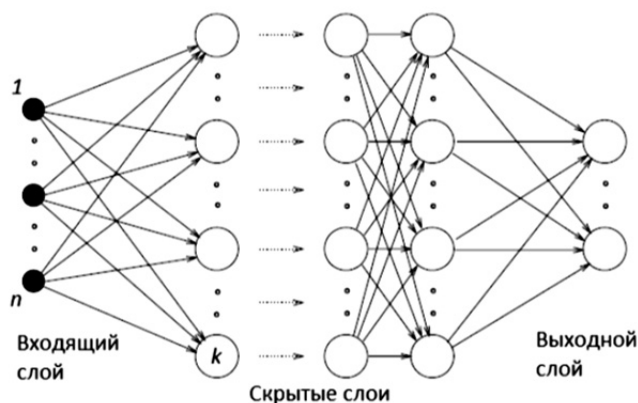


Рис. 1. Структурная схема многослойного перцептрона

Fig. 1. The structural diagram of a multilayer perceptron

Как и любая другая нейронная сеть, персептрон, изображенный на рис. 1, состоит:

- из набора сенсорных элементов, образующих входной слой ИНС;
- нелинейных вычислительных элементов, называемых искусственными нейронами, которые составляют скрытые и выходной слои персептрона;
- линейных синаптических связей, обеспечивающих соединение всех элементов в единую сеть.

Данная нейронная сеть характеризуется набором гиперпараметров:

- значение момента инерции и скорости обучения ИНС на каждом шаге обучения;
- количество скрытых слоев и нейронов в каждом скрытом слое;
- наличие смещения функции активации.

Выбор оптимального значения всех гиперпараметров является важнейшей задачей при проектировании ИНС. Несмотря на то что математическое описание работы многослойных персептронов произошло в середине XX века, до сих пор нет формализованных методов определения оптимального значения гиперпараметров. Преодоление вышеприведенных недостатков на практике достигается перебором различных вариантов архитектур, типов нейронов, начальных условий, методов обучения и дальнейшим выбором наиболее удачного решения [6]. Поэтому процесс проектирования нейронной сети является творческой задачей.

Количество нейронов во входном и выходном слоях определяется на основе числа входных параметров и желаемого отклика ИНС. В случае прогнозирования почасовых объемов потребления электроэнергии на следующие сутки размер входного и выходного слоев определяется на основе исходных данных:

$$\begin{cases} m_0 = 24f, \\ m_3 = 24, \end{cases} \quad (3)$$

где m_0 – размер входного сенсорного слоя ИНС; f – количество факторов, учитываемых при STLF; m_3 – размер выходного слоя, соответствующий 24 значениям прогнозного СГЭН на следующие сутки.

Количество скрытых слоев, а также размер каждого из них влияют на ассоциативную способность нейронной сети. Ассоциативная память подразумевает создание отклика сети на основе внутреннего представления ИНС об окружающей среде, с которой взаимодействует сенсорный слой сети, а не простое воспроизведение запомненных образов. Считается, что трехслойный персептрон является универсальным аппроксиматором. Добавление дополнительных скрытых слоев позволяет выявлять в данных статистики высшего порядка. При решении практических задач ограничиваются одним или двумя скрытыми слоями. Большое количество скрытых слоев не позволяет добиться значительного улучшения обобщающей способности ИНС, в то же время значительно увеличивая затраты вычислительной мощности на обработку сигналов, описывающих работу ИНС.

Количество нейронов в скрытых слоях влияет на размер параллельно распределенной памяти нейронной сети. Чтобы ИНС обладала хорошей обобщающей способностью, необходимо подобрать оптимальное количество

нейронов в скрытых слоях. Слишком маленькое количество нейронов не позволит ИНС извлечь из обучающей выборки всю полезную информацию, необходимую для создания качественного представления об объекте прогнозирования. ИНС со слишком большим количеством нейронов в скрытых слоях будет склонна к переобучению и простому запоминанию образов из обучающей выборки. Данная сеть будет показывать отличные результаты при обработке образов, которые запомнила сеть в процессе обучения. Однако при обработке образов, неизвестных ИНС после окончания обучения, сеть будет допускаться серьезные ошибки прогнозирования.

В настоящее время существуют только практические рекомендации по выбору оптимального размера скрытых слоев. Одним из них является правило геометрической пирамиды [11]:

$$\begin{cases} m_1 = m_3 \left(\sqrt[3]{\frac{m_0}{m_3}} \right)^2, \\ m_2 = m_3 \sqrt[3]{\frac{m_0}{m_3}}, \end{cases} \quad (4)$$

где m_1 – количество нейронов в первом скрытом слое; m_2 – количество нейронов во втором скрытом слое.

Однако данная рекомендация является эмпирическим выражением и ни на какую теоретическую обоснованность не претендует. Оптимальный размер скрытых слоев определяется исключительно на основе многочисленных экспериментов с обучающей и тестовой выборкой.

Остальные гиперпараметры ИНС вытекают из принципа функционирования искусственного нейрона. На рис. 2 представлена функциональная схема искусственного нейрона.

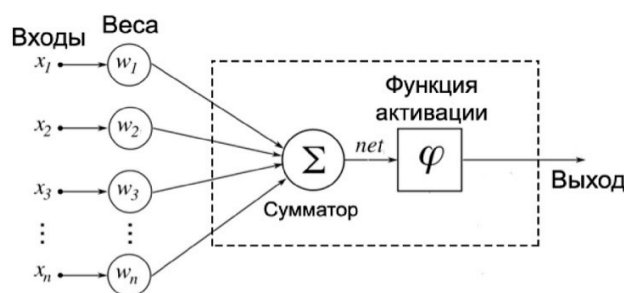


Рис. 2. Функциональная схема нейрона

Fig. 2. The functional diagram of a neuron

Данная схема состоит из четырех основных элементов:

- набор синаптических связей, характеризующихся силой сигнала x_i и весом w_k ;
- сумматор – складывает входные сигналы соответствующих синаптических связей;

– порог – увеличивает или уменьшает амплитуду сигнала, подаваемого на вход функции активации;

– функция активации – ограничивает амплитуду выходного сигнала нейрона. Обычно диапазон амплитуд лежит в интервале $[0;1]$ или $[-1;1]$ в зависимости от вида данной функции.

Математически функционирование нейрона можно представить следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj}x_j, \\ v_k = u_k + b_k, \\ y_k = \varphi(v_k), \end{cases} \quad (5)$$

где u_k – линейная комбинация входных воздействий нейрона k ; w_{kj} – вес синаптической связи, соединяющей нейрон k и нейрон j ; x_j – входной сигнал нейрона k от нейрона j ; v_k – индуцированное локальное поле нейрона k ; b_k – порог активации нейрона k ; y_k – выходной сигнал нейрона k ; $\varphi(v_k)$ – функция активации.

Обучение персептрона с помощью алгоритма обратного распространения ошибки предполагает два прохода вычислений – прямой и обратный. При прямом проходе веса взаимодействия синаптических связей остаются неизменными. Функциональный сигнал, поступающий на вход сети, передается от слоя к слою, формируя итоговый отклик сети на основании выражения (5).

При обратном проходе на основе выражения (1) вычисляются сигнал ошибки и функция энергии ошибки для каждого нейрона скрытых и выходного слоев. Вычисляется сумма энергий ошибки по всем нейронам выходного слоя:

$$E_C(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n), \quad (6)$$

где C – множество нейронов выходного слоя.

На основе выражений (1), (5), (6) можно сделать вывод, что функция энергии ошибки зависит только от свободных параметров ИНС (весов синаптических связей и порогов активации). Данная функция образует так называемую поверхность ошибки в пространстве свободных параметров ИНС. Целью обучения является итеративная коррекция весов синаптических связей и порогов активации с целью нахождения глобального минимума на поверхности ошибки.

Стохастическая градиентная оптимизация имеет ключевое практическое значение во многих областях науки и техники. Многие проблемы в этих областях могут быть представлены как оптимизация некоторых скалярных параметров целевой функции, требующих максимизации или минимизации. Если целевая функция дифференцируема по своим параметрам, то градиентный спуск является относительно эффективным методом оптимизации [12].

Поиск глобального минимума на поверхности ошибки с помощью метода градиентного спуска (SGD) происходит на основании цепного правила:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(n)}{\partial w_{kj}(n)} &= \frac{\partial E(n)}{\partial e_k(n)} \frac{\partial e_k(n)}{\partial y_k(n)} \frac{\partial y_k(n)}{\partial v_k(n)} \frac{\partial v_k(n)}{\partial w_{kj}(n)} = \\ &= -e_k(n) \varphi'(v_k(n)) x_j(n) = -\delta_k(n) x_j(n), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\delta_k(n)$ – локальный градиент нейрона k на шаге обучающего цикла n .

В случае сигмоидальной функции активации коррекция веса синаптической связи между нейроном k и нейроном j определяется на основе следующего выражения:

$$\Delta w_{kj}(n) = \eta \delta_k(n) x_j(n) + \alpha \Delta w_{kj}(n-1), \quad (8)$$

где $\Delta w_{kj}(n)$ – корректировка веса взаимодействия между нейронами k и j на шаге обучения n ; η – параметр скорости обучения; α – параметр момента инерции; $\Delta w_{kj}(n-1)$ – корректировка веса взаимодействия между нейронами k и j на шаге обучения $n-1$.

Из выражения (7) следует, что оптимальное значение параметра скорости обучения и момента инерции на каждом шаге обучающего цикла влияет на способность схождения алгоритма градиентного спуска к глобальному минимуму на поверхности ошибки, в которой функция энергии ошибки принимает минимальное значение. Параметр скорости обучения влияет на величину корректировки веса на данном шаге обучения. Момент инерции оказывает стабилизирующий эффект:

– если на двух последовательных итерациях обучающего цикла знак локального градиента нейрона $\delta_k(n)$ не изменяется, то за счет постоянной момента инерции величина корректировки свободных параметров ИНС увеличивается в данном направлении;

– если на двух последовательных итерациях обучающего цикла знак локального градиента $\delta_k(n)$ изменяется (нахождение рабочей точки алгоритма обучения в окрестности глобального минимума на поверхности ошибки), то за счет постоянной момента инерции величина корректировки веса уменьшается.

На рис. 3 представлен градиентный спуск по поверхности ошибки при различных значениях скорости обучения и момента инерции. Из рисунка можно сделать вывод, что малое значение параметра скорости обучения или момента инерции способствует «застреванию» алгоритма обучения в локальных минимумах и на «плоских» участках поверхности ошибки. Слишком большое значение данных гиперпараметров способствует тому, что рабочая точка алгоритма обучения постоянно перешагивает глобальный минимум, но не попадает в него. Также можно сделать вывод о том, что для ускорения схождения алгоритма к глобальному минимуму параметры скорости обучения и момента инерции должны иметь достаточно большое значение в начале обучающего цикла и постепенно уменьшаться по мере приближения к минимуму. Поэтому выбор оптимального значения параметра скорости обучения

и момента инерции на каждом шаге обучающего цикла определяет эффективность обучения ИНС. Схождение алгоритма градиентного спуска к локальным минимумам является главным препятствием к повышению качества краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки с помощью многослойного персептрона.

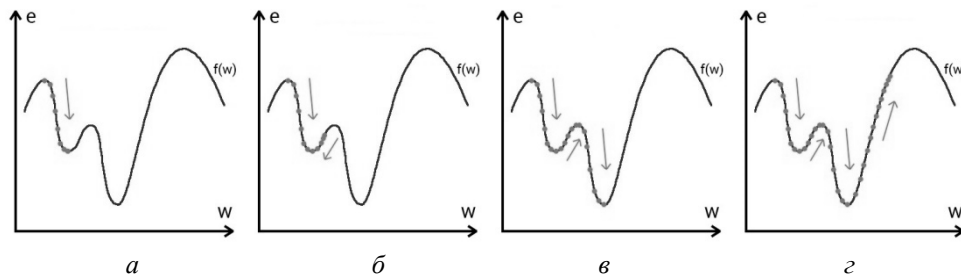


Рис. 3. Градиентный спуск по поверхности ошибки при различных значениях скорости обучения и момента инерции:

a – малое значение скорости обучения без момента инерции; *б* – недостаточное значение скорости обучения и (или) момента инерции; *в* – оптимальное значение скорости обучения и момента инерции; *г* – слишком большое значение скорости обучения и (или) момента инерции

Fig. 3. A gradient descent along the error surface at various values of the learning rate and momentum rate:

a is small value of the learning rate and without the momentum rate; *b* is a insufficient value of the learning and (or) the momentum rate; *c* is an optimal value of the learning and the momentum rate; *d* is a large value of the learning and (or) the moment rate

За последние несколько лет разработано много успешных алгоритмов, минимизирующих количество параметров, которые требуют настройки в процессе последовательного обучения ИНС [12]. Современные инструменты машинного обучения позволяют реализовать алгоритм обратного распространения ошибки с адаптивными в процессе обучения параметрами скорости обучения и постоянной момента инерции (ADAM) [12, 14]. Адаптивные методы обучения, такие как ADAM, обеспечивает наилучшую сходимость алгоритма обучения [14]. Данная модификация алгоритма градиентного спуска позволяет сходиться алгоритму к окрестности глобального минимума практически при любом «ландшафте» поверхности ошибки за счет более эффективного прохождения локальных минимумов и «плоских» участков на поверхности ошибки.

3. МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ АЛГОРИТМА ОБУЧЕНИЯ И БОРЬБЫ С ПЕРЕОБУЧЕНИЕМ ИНС

Глубокие нейронные сети с большим количеством свободных параметров являются очень мощными системами машинного обучения. Однако в таких сетях переобучение является серьезной проблемой [15]. После спуска рабочей точки алгоритма обучения достаточно близко к глобальному минимуму на поверхности ошибки, дальнейшее обучение ИНС за счет корректировки весов синаптических связей приведет к тому, что веса взаимодействия

некоторых связей необоснованно увеличатся. Это приведет к тому, что ИНС будет придавать слишком большое значение при краткосрочном прогнозировании потребления электроэнергии одним факторам и занижать степень влияния других. Нейронная сеть попросту потеряет обобщающую способность за счет ассоциативной памяти. Данная ИНС вследствие переобучения будет запоминать образы из обучающей выборки, вместо того чтобы искать тенденции и скрытые связи в данных.

Во избежание данной ситуации необходимо постоянно проверять обобщающую способность ИНС за счет перекрестной проверки сети (cross-validation). Для этого база исходных данных разделяется на обучающее и тестовое множество. ИНС обучается на данных из обучающего множества, а обобщающая способность оценивается с помощью тестового множества, образы из которого неизвестны сети после окончания обучения.

Существует два действенных способа предотвращения переобучения ИНС:

- ранняя остановка алгоритма обучения (early stopping) после того, как обобщающая способность ИНС достигнет максимального значения;
- отключение случайных нейронов скрытых слоев (Dropout) [15].

Первый способ борьбы с переобучением является достаточно эффективным вследствие того, что практически невозможно подобрать оптимальное количество эпох обучающего цикла. Так как начальное значение весов синаптических связей ИНС имеет случайное распределение по нормальному закону, то невозможно изначально определить «ландшафт» поверхности ошибки. Вследствие этого неизвестно, за какое количество итераций рабочая точка алгоритма обучения дойдет до окрестности глобального минимума. Соответственно, возникает необходимость остановить алгоритм обучения после достижения окрестности глобального минимума. Индикатором того, что рабочая точка алгоритма достигла окрестности глобального минимума, является малое изменение абсолютной ошибки в течение эпохи обучения:

$$\frac{1}{C} \sum_{j \in C} \Delta e_j(n) \leq 0,005 - 0,01, \quad (9)$$

где $\Delta e_j(n)$ – изменение абсолютной ошибки нейрона j выходного слоя в течение эпохи обучения n .

Для того чтобы ранняя остановка не привела к преждевременной остановке алгоритма обучения в области локального минимума или плоского участка на поверхности ошибки, необходимо установить количество итераций, в течение которых проводится перекрестная проверка сети, равное пяти-семи. Этого будет достаточно для того, чтобы рабочая точка алгоритма преодолела плоские участки поверхности ошибки, но в то же время ИНС не подверглась переобучению.

Второй способ борьбы с переобучением основан на увеличении равномерности распределения полезной информации, извлеченной в процессе обучения из обучающей выборки, по всем нейронам сети. Отключение случайных нейронов скрытых слоев ИНС позволяет избежать перенасыщения весов отдельных синаптических связей, так как они могут быть исключены из работы ИНС на протяжении некоторой эпохи обучающего цикла. Данное об-

стоятельство заставляет нейронную сеть распределять информацию, полученную из статистической базы, на все нейроны вместо концентрации мощности в отдельных узлах сети.

Использование ансамблей нейронных сетей является одним из самых действенных способов усиления алгоритма обучения ИНС, используемой для решения задачи прогнозирования потребления электроэнергии ГТП на следующие сутки [16]. Ансамбль представляет собой ассоциативную машину, состоящую из нескольких параллельно работающих нейронных сетей. Каждая отдельная ИНС представляет собой так называемого эксперта. Отклики каждого эксперта некоторым образом комбинируются, формируя итоговый отклик ассоциативной машины. Каждая из нейронных сетей принимает на вход только вектор показателей объекта исследования, а информация о типе моделируемого воздействия представлена во всех весовых коэффициентах модели [17]. На рис. 4 представлена блочная диаграмма ассоциативной машины.

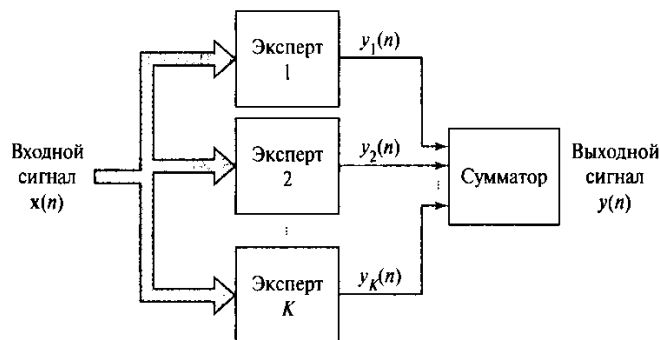


Рис. 4. Блочная диаграмма ассоциативной машины

Fig. 4. Block diagram of an associative machine

Использование ассоциативных машин обусловлено следующим:

- уменьшением времени обучения ансамбля ИНС по сравнению с единой ИНС большего размера вследствие значительного уменьшения затрат вычислительной мощности на обучение отдельных ИНС;

- уменьшение риска переобучения ИНС вследствие уменьшения количества настраиваемых параметров каждой ИНС в ансамбле по отношению к размеру множества статистических данных обучения;

- увеличение эффективности ассоциативной машины за счет того, что эксперты будут сходиться к различным окрестностям глобального минимума на поверхности ошибки и некоторая комбинация откликов отдельных ИНС будет увеличивать эффективность ансамбля.

Существуют различные способы обучения отдельных экспертных нейронных сетей, а также получения итогового отклика ассоциативной машины. В настоящее время при решении практических задач хорошо зарекомендовали себя ансамбли ИНС одинаковой архитектуры и конфигурации, которые начинают обучение из различных исходных состояний. Для получения итогового выходного сигнала используется блок усреднения по ансамблю.

4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЧАСОВЫХ ОБЪЕМОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СЛЕДУЮЩИЕ СУТКИ

Прогнозирование почасового потребления электроэнергии на следующие сутки является сложной оптимизационной задачей. Точность прогнозирования зависит не только от эффективности используемых алгоритмов, но также от качества проанализированных данных и возможности включить важные внешние факторы в модель [18]. Статистические подходы к STLFF обычно нуждаются в математической модели, которая представляет электрическую нагрузку как функцию различных факторов, таких как время, погода и класс потребителей [19].

Правильный выбор, предварительная обработка и кодирование основных влияющих факторов являются залогом качественного прогноза, полученного любым методом. Выбор набора основных факторов производится с помощью метода экспертных оценок, на основе опыта работы с объектом прогнозирования. К основным факторам, влияющими на почасовую электрическую нагрузку ГТП гарантирующего поставщика второго уровня, включающих сельскохозяйственных производителей, население и приравненных к нему потребителей, а также мелкомоторную нагрузку, можно отнести:

- порядковый номер дня в году;
- порядковый номер дня в неделе;
- час суток;
- признак праздничного дня;
- признак каникул в образовательных учреждениях;
- признак наличия центрального отопления;
- ветрово-холодовой индекс;
- дисперсию температуры;
- количество осадков;
- длительность светового дня;
- режим работы каждого крупного потребителя электроэнергии, входящего в ГТП.

Также важнейшим фактором, влияющим на потребление электроэнергии ГТП, являются плановые и аварийные работы на электросетевом оборудовании. Однако в силу того, что в состав ГТП обычно входят несколько подстанций с множеством фидеров, питающих отдельные точки поставки электроэнергии, введение фактора отключений на каждом фидере подстанций сильно увеличит размерность факторного пространства и, как следствие усложнит архитектуру нейронной сети. Это, в свою очередь, приведет к увеличению количества синаптических связей ИНС и значительному увеличению времени обучения ИНС. В процессе обучения составляющая временного ряда электрической нагрузки ГТП, приходящаяся на отключение электросетевого оборудования, будет классифицирована нейронной сетью как шум, не несущий полезной информации о поведении временного ряда.

В то же время игнорирование плановых работ на сетевом оборудовании подстанций, входящих в ГТП, при формировании прогноза потребления электроэнергии «на сутки вперед» приведет к резкому снижению точности прогнозирования. Целесообразно получить прогноз потребления электро-

энергии на основе вышеперечисленных факторов с помощью нейронной сети, а затем скорректировать данный прогноз на основе графика плановых ремонтных работ на сетевом оборудовании с помощью метода экспертных оценок. Для учета аварийных отключений при STLF необходимо произвести дополнительное прогнозирование отказов элементов электросетевого оборудования. Одним из наиболее интересных и перспективных способов прогнозирования возможных отказов элементов электрической сети является использование подходов, основанных на методах нейросетевого моделирования [20].

Закодированные фактические величины влияющих факторов представляют собой статистическую базу, на основе которой происходит обучение многослойного персептрона. При использовании сигмоидальной логистической функции активации необходимо масштабировать входные данные к диапазону $[0;1]$. Также для улучшения сходимости алгоритма обратного распространения ошибки необходимо сдвинуть данные от границ этого диапазона, так как логистическая функция вблизи границ своей области определения имеет участки насыщения, то есть диапазон изменения входных данных будет равен $[0,05; 0,95]$.

После предварительной обработки исходных данных необходимо произвести разделение всего множества на тренировочные и тестовые выборки. Для решения задачи краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии размер обучающей выборки выбирается равным 90 % от всего множества статистических данных. Размер тестовой выборки, на которой будет производиться перекрестная проверка ИНС, выбирается равным 10 % от множества статистических данных.

После выбора основных влияющих факторов необходимо определиться с окончательной архитектурой ИНС. Для случая ГТП, в состав которой не входят крупные потребители электроэнергии, электрическая нагрузка которых сопоставима с нагрузкой всей ГТП, на основе выражений (3) и (5) размер каждого слоя ИНС будет равен:

$$\begin{cases} m_0 = 24f = 24 \cdot 10 = 240, \\ m_1 = m_3 \left(\sqrt[3]{\frac{m_0}{m_3}} \right)^2 = 24 \left(\sqrt[3]{\frac{240}{24}} \right)^2 = 111, \\ m_2 = m_3 \sqrt[3]{\frac{m_0}{m_3}} = 24 \sqrt[3]{\frac{240}{24}} = 52, \\ m_3 = 24. \end{cases} \quad (10)$$

Практическая реализация многослойных персептронов необходимой архитектуры и конфигурации производится с помощью библиотеки машинного обучения Tensorflow Keras на языке программирования Python 3.6. На рис. 5 представлена архитектура ансамбля нейронных сетей реализованного с помощью библиотеки машинного обучения Tensorflow Keras.

Layer (type)	Output Shape	Param #	Connected to
input_3 (InputLayer)	(None, 240)	0	
dense_19 (Dense)	(None, 111)	26751	input_3[0][0]
dense_22 (Dense)	(None, 111)	26751	input_3[0][0]
dense_25 (Dense)	(None, 111)	26751	input_3[0][0]
dense_20 (Dense)	(None, 52)	5824	dense_19[0][0]
dense_23 (Dense)	(None, 52)	5824	dense_22[0][0]
dense_26 (Dense)	(None, 52)	5824	dense_25[0][0]
dense_21 (Dense)	(None, 24)	1272	dense_20[0][0]
dense_24 (Dense)	(None, 24)	1272	dense_23[0][0]
dense_27 (Dense)	(None, 24)	1272	dense_26[0][0]
average_3 (Average)	(None, 24)	0	dense_21[0][0] dense_24[0][0] dense_27[0][0]

=====
 Total params: 101,541
 Trainable params: 101,541
 Non-trainable params: 0

Рис. 5. Архитектура ансамбля нейронных сетей реализованного с помощью библиотеки машинного обучения Tensorflow Keras

Fig. 5. The architecture of the neural network ensemble which is obtained by the Tensorflow Keras machine learning library

Сеть, изображенная на рис. 5, представляет собой ассоциативную машину, состоящую из трех четырехслойных персептронов. Итоговый отклик ИНС получается в результате операции усреднения по ансамблю (блок Average). Данная ИНС имеет 101 541 свободный параметр, которые оптимизируются в процессе обучения.

Обучение происходит в последовательном режиме, когда свободные параметры ИНС корректируются после подачи каждого примера из обучающей выборки. Максимальное количество эпох обучающего цикла составляет 100. В процессе обучения используется ранняя остановка. Критерием остановки алгоритма обучения определяется невыполнение условия выражения (9) в течение пяти последовательных эпох обучения. На рис. 6 представлен экран мониторинга параметров ИНС в процессе обучения.

```

855/855 [=====] - 1s 2ms/step - loss: 1.9352e-04 - mean_absolute_error: 0.0101 - val_loss: 6.7088e-0
5 - val_mean_absolute_error: 0.0065
Epoch 33/100
855/855 [=====] - 1s 2ms/step - loss: 1.8975e-04 - mean_absolute_error: 0.0100 - val_loss: 6.3076e-0
5 - val_mean_absolute_error: 0.0063
Epoch 34/100
855/855 [=====] - 1s 2ms/step - loss: 1.8620e-04 - mean_absolute_error: 0.0099 - val_loss: 5.9941e-0
5 - val_mean_absolute_error: 0.0061
Epoch 35/100
855/855 [=====] - 1s 2ms/step - loss: 1.8286e-04 - mean_absolute_error: 0.0098 - val_loss: 5.7565e-0
5 - val_mean_absolute_error: 0.0060
Epoch 36/100
855/855 [=====] - 2s 2ms/step - loss: 1.7972e-04 - mean_absolute_error: 0.0097 - val_loss: 5.5765e-0
5 - val_mean_absolute_error: 0.0059
Epoch 37/100
855/855 [=====] - 1s 2ms/step - loss: 1.7680e-04 - mean_absolute_error: 0.0096 - val_loss: 5.4345e-0
5 - val_mean_absolute_error: 0.0058
Ошибка прогноза на тестовых данных: 0.58%
Время обучения заняло 53.29803204536438 секунд
  
```

Рис. 6. Экран мониторинга параметров ИНС в процессе обучения

Fig. 6. Monitoring screen of ANN parameters in the learning process

Как мы видим из рис. 6, инструментарий библиотеки Tensorflow Keras позволяет производить мониторинг средней абсолютной ошибки (mean_absolute_error), значения функции энергии ошибки (val_loss), обобщающую способность ИНС после каждой итерации обучающего цикла (val_mean_absolute_error), а также длительность обучения.

После окончания обучения, то есть достижения окрестности глобального минимума на поверхности ошибки, свободные параметры ИНС «замораживаются». После этого для получения прогноза почасового потребления электроэнергии ГТП «на сутки вперед» необходимо опросить ИНС примером входных данных, соответствующих суткам, на которые производится прогнозирование. В табл. 1 представлены результаты прогнозирования почасового потребления электроэнергии ГТП «на сутки вперед» с 09.04.2018 по 09.05.2018.

**Результаты прогнозирования почасового потребления электроэнергии ГТП
«на сутки вперед» с 09.04.2018 по 09.05.2018**

**Results of prediction of an hourly electricity consumption of the delivery point cluster
for the “day-ahead market” from 04.09.2018 to 05.09.2018**

Алгоритм обучения ИНС	Постоянные момента инерции и скорости обучения (SGD)	Адаптивный момент инерции и скорость обучения (ADAM)	Отключение нейронов скрытого слоя с вероятностью 20 % (ADAM+dropout)	Ансамбль (ADAM)	Метод экспертных оценок
Средняя ошибка прогноза (MAPE), %	2,68	2,66	2,67	2,55	2,55

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты исследования подтверждают эффективность применения ансамбля ИНС, состоящего из нескольких четырехслойных персептронов, с адаптивными в процессе обучения параметрами скорости обучения и момента инерции. Точность STLF ГТП на следующие сутки, полученного с помощью ассоциативной машины, идентична точности прогноза метода экспертных оценок. При этом возможность формализации и автоматизации процесса прогнозирования, а также значительное увеличение скорости выполнения прогноза делает более привлекательным применение ансамблей ИНС.

2. Стоит отметить, что техника борьбы с переобучением Dropout, хорошо зарекомендовавшая себя при решении практических задач, является неэффективной при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки. Это обусловлено спецификой поведения временного ряда потребления электроэнергии ГТП с разнородной электрической нагрузкой. Применение техники ранней остановки (early stopping) позволяет избежать переобучения ИНС без применения техники отключения случайных нейронов скрытых слоев.

3. Точность STLF определяется не только мощностью алгоритма прогнозирования, но и качеством обучающей выборки. Анализ факторного пространства, а также предварительная обработка статистических данных является важнейшим этапом прогнозирования «на сутки вперед» потребления электроэнергии ГТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Торопов А.С., Туликов А.Н.* Прогнозирование почасового электропотребления региональной энергосистемы с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 5. – С. 143–151. – DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-143-151.
2. *Доманов В.И., Билалова А.И.* Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 59–65. – DOI: 10.14529/power160208.
3. A short-term electricity price forecasting scheme for power market / G. Gao, K. Lo, J.F. Lu., F.L. Fan // World Journal of Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 4. – P. 58–65.
4. *Кирпичникова И.М., Саплин Л.А., Соломахо К.Л.* Прогнозирование объемов потребления электроэнергии // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 16–21.
5. *Станкевич Т.С.* Разработка метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 9. – С. 111–120. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-111-120.
6. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Синтез нейронной сети для реализации рекуррентного метода наименьших квадратов // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 33–42. – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42.
7. *Ruzic S., Vuckovic A., Nikolic N.* Weather sensitive method for short term load forecasting in electric power Utility of Serbia // IEEE Transactions on Power Systems. – 2003. – Vol. 18, N 4. – P. 1581–1586.
8. *Hayes A.* First links in the Markov chain // American Scientist. – 2013. – Vol. 101. – P. 92–97.
9. *Николаева Ю.В.* Метод генерации выходной выборки для задачи нейросетевой классификации рыночных ситуаций // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 12. – С. 86–92. – DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-86-92.
10. *Кориков А.М., Нгуен А.Т.* Нейро-нечеткая классификация объектов и их состояний // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 73–86. – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-73-86.
11. *Genco S., Yildiray P., Umrhan S.* An artificial neural network model for Na/K geothermometer // Proceedings World Geothermal Congress. – Bali, Indonesia, 2010. – P. 1–10.
12. *Kingma D.P., Ba L.J.* ADAM: a method for stochastic optimization // 3rd International Conference for Learning Representations, San Diego, 2015. – Ithaca, NY: arXiv.org, 2015. – arXiv: 1412.6980.
13. *Duchi J., Hazan E., Singer Y.* Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – P. 2121–2159.
14. *Ruder S.* An overview of gradient descent optimization algorithms. – Ithaca, NY: arXiv.org, 2017. – arXiv: 1609.04747.
15. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting / N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, R. Salakhutdinov // Journal of Machine Learning Research. – 2014. – Vol. 15. – P. 1929–1958.
16. *Li S., Wang P., Goel L.* A novel wavelet-based ensemble method for short-term load forecasting with hybrid neural networks and feature selection // IEEE Transactions on Power Systems. – 2016. – Vol. 31, iss. 3. – P. 1788–1798.
17. *Гергет О.М., Мецерьков П.В.* Применение информационных методов, нейронных сетей и генетического алгоритма для решения задачи выбора схемы лечения // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-7-20.
18. *Rajan D.V., Sourav M., Thakur S.S.* An efficient approach for short-term load forecasting using historical data // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2012. – Vol. 1, iss. 3. – P. 1–9.

19. Masood N.A., Ahsan Q. A methodology for identification of weather sensitive component of electrical load using empirical mode decomposition technique // *Energy and Power Engineering*. – 2013. – Vol. 5. – P. 293–300.

20. Карамов Д.Н., Наумов И.В., Пержабинский С.М. Математическое моделирование отказов элементов электрической сети (10 кв) автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329, № 7. – С. 116–130.

Хомутов Станислав Олегович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление исследований – повышение надежности электрических машин и оборудования. Имеет более 250 публикаций, в том числе 6 монографий и 12 учебных пособий. E-mail: homutov.so@yandex.ru.

Серебряков Николай Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление исследований – прогнозирование потребления электроэнергии и электрических нагрузок. Имеет 13 публикаций. E-mail: na_serebryakov@altke.ru.

Khomutov Stanislav Olegovich, D.Sc. (Eng.), professor, head of the department of power supply of industrial enterprises in the Altai Technical University named after I.I. Polzunov. His research interests are focused on forecasting of the reliability of electric machines and equipment. He is the author of more than 250 publications including 6 monographs and 12 teaching manuals. E-mail: homutov.so@yandex.ru

Serebryakov Nikolai Alexandrovich, a postgraduate student at the department of power supply of industrial enterprises in the Altai Technical University named after I.I. Polzunov. His research interests are focused on forecasting of the consumption of power and electric loads. He has published 13 research papers. E-mail: na_serebryakov@altke.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-149-168

Increasing the quality of short-term load forecasting of the delivery point cluster of agricultural producers with a learning machine*

S.O. KHOMUTOV^a, N.A. SEREBRYAKOV^b

Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 46 Lenin Prospekt, Barnaul, 656038, Russian Federation

^a *homutov.so@yandex.ru* ^b *na_serebryakov@altke.ru*

Abstract

Currently, the problem of power consumption forecasting has become much more urgent. The accuracy of the short-term load forecasting depends on the financial results of the wholesale electricity market members and the power system safety. It is necessary to consider many factors for forecasting of hourly electric load time series with high accuracy. Therefore, this task is non-formalizable. The modern level of information technology allows the use of artificial neural networks (ANN) for solution such problems.

This article deals with the problem of improving the quality of short-term load forecasting of the delivery point cluster of a guaranteeing provider including large agricultural producers with the help of ANN. The questions of choosing the learning paradigm, an opti-

* *Received 15 April 2019.*

mal architecture and a learning algorithm of the neural network are considered. The optimal number and size of hidden layers of a multilayer perceptron is determined by means of the geometric pyramid rule. The influence of the learning rate and the momentum rate on the neural network ability to search a global minimum on the error surface in the space of free parameters is investigated. The use of adaptive learning and momentum rate parameters in the learning process has been justified. The main techniques of overcoming the overtraining of neural networks are considered. An increase in the computational efficiency of the ANN ensemble is analyzed. The problems of coding the factor space, as well as preliminary processing and scaling of training and testing data are considered. The practical implementation of ANNs of various architectures and configurations with the help of the machine learning library in Python 3.6 is considered. A comparative analysis of the accuracy of short-term load forecasting of a delivery point cluster, which is obtained with help of neural network and the Delphi method, is made.

Keywords: forecasting, hyperparameter, wholesale electricity market, electric load, factors, delivery point cluster, artificial neural network, learning paradigm, learning algorithm, gradient descent, error surface, global minimum

REFERENCES

1. Toropov A.S., Tulikov A.N. Prognozirovanie pochasovogo elektropotrebleniya regional'noi energosistemy s ispol'zovaniem iskusstvennykh neironnykh setei [Forecasting of regional power supply system power consumption per hour using artificial neural networks]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 143–151. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-143-151.
2. Domanov V.I., Bilalova A.I. Prognozirovanie ob"emov energopotrebleniya v zavisimosti ot iskhodnoi informatsii [Forecasting power consumption based on source information]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika – Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 59–65. DOI: 10.14529/power160208.
3. Gao G., Lo K., Lu J.F., Fan F.L. A short-term electricity price forecasting scheme for power market. *World Journal of Engineering and Technology*, 2016, vol. 4, pp. 58–65.
4. Kirpichnikova I.M., Saplin L.A., Solomakhov K.L. Prognozirovanie ob"emov potrebleniya elektroenergii [Energy consumption forecasting]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika – Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 16–22.
5. Stankevich T.S. Razrabotka metoda operativnogo prognozirovaniya dinamiki razvitiya lesnogo pozhara posredstvom iskusstvennogo intellekta i glubokogo mashinnogo obucheniya [Development of operational prediction method of forest fire dynamics based on artificial intelligence and deep machine learning]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 111–120. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-111-120.
6. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Sintez neironnoi seti dlya realizatsii rekurrentnogo metoda naimen'shikh kvadratov [Synthesis of a neural network for the implementation of the recursive leastsquares method]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 33–42. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42.
7. Ruzic S., Vuckovic A., Nikolic N. Weather sensitive method for short term load forecasting in electric power Utility of Serbia. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, vol. 18, no. 4, pp. 1581–1586.
8. Hayes A. First links in the Markov chain. *American Scientist*, 2013, vol. 101, pp. 92–97.
9. Nikolaeva Yu.V. Metod generatsii vykhodnoi vyborki dlya zadachi neirosetevoi klassifikatsii rynochnykh situatsii [Method of output sample generation for neuronet classification problem of market situations]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 12, pp. 86–92. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-86-92.
10. Korikov A.M., Nguen A.T. Neuro-nechetkaya klassifikatsiya ob"ektov i ikh sostoyanii [A neuro-fuzzy classification of objects and their states]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 73–86. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-73-86.

11. Genco S., Yildiray P., Umran S. An artificial neural network model for Na/K geothermometer. *Proceedings World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia, 2010, pp. 1–10.
12. Kingma D.P., Ba L.J. ADAM: a method for stochastic optimization. *3rd International Conference for Learning Representations*, San Diego, 2015, arXiv: 1412.6980.
13. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, pp. 2121–2159.
14. Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms. Ithaca, NY, ArXiv.org, 2017, arXiv: 1609.04747.
15. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 2014, vol. 15, pp. 1929–1958.
16. Li S., Wang P., Goel L. A novel wavelet-based ensemble method for short-term load forecasting with hybrid neural networks and feature selection. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31, iss. 3, pp. 1788–1798.
17. Gerget O.M., Meshcheryakov R.V. Primenenie informatsionnykh metodov, neironnykh setei i geneticheskogo algoritma dlya resheniya zadachi vybora skhemy lecheniya [Applying information methods, neural networks and genetic algorithms for solving the problem of selecting a scheme of treatment]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 7–20. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-7-20.
18. Rajan D.V., Sourav M., Thakur S.S. An efficient approach for short-term load forecasting using historical data. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2012, vol. 1, iss. 3, pp. 1–9.
19. Masood N.A., Ahsan Q. A methodology for identification of weather sensitive component of electrical load using empirical mode decomposition technique. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, pp. 293–300.
20. Karamov D.N., Naumov I.V., Perzhabinskii S.M. Matematicheskoe modelirovanie otkazov elementov elektricheskoi seti (10 kv) avtonomnykh energeticheskikh sistem s vozobnovlyaemoi raspredelennoi generatsiei [Mathematical modelling of failures of electrical grid (10 kv) of autonomous energy systems with renewable distributed generation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, iss. 7, pp. 116–130.

Для цитирования:

Хомутов С.О., Серебряков Н.А. Повышение качества краткосрочного прогнозирования электропотребления группы точек поставки электроэнергии сельхозпроизводителей с помощью инструментов машинного обучения // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 149–168. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-149-168.

For citation:

Khomutov S.O., Serebryakov N.A. Povyshenie kachestva kratkosrochnogo prognozirovaniya elektropotrebleniya gruppy tochek postavki elektroenergii sel'khozproizvoditelei s pomoshch'yu instrumentov mashinnogo obucheniya [Increasing the quality of short-term load forecasting of the delivery point cluster of agricultural producers with a learning machine]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 149–168. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-149-168.

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000 года. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Научный вестник НГТУ» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям);

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление;

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей;

05.13.17 – Теоретические основы информатики;

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;

05.14.00 – Энергетика;

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы;

05.14.12 – Техника высоких напряжений;

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты.

Разделы журнала: приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; информатика, вычислительная техника и управление; энергетика.

Рекомендуемый объем статьи 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: <http://journals.nstu.ru/vestnik>

Условия приема статей

В редакцию **Научного вестника НГТУ** представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.

4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.

5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – **Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3	верхнее поле – 4,0
правое поле – 3,3	нижнее поле – 3,9
текстовое поле 22 × 14,4	

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, межстрочный интервал с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение, Постановка задачи, Методы анализа, Основной результат, Выводы** или **Заключение**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис.* и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в подписях не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0С. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha.$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул помещать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \quad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются сверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: **Файл / Параметры страницы / Разметка; установить разные четные и нечетные и первая отличается.**

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи – с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8. Номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы – пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы пустая строка размером 10. Порядковый номер – с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка – по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий; e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках.**

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК, и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте <http://journal.nstu.ru/vestnik>.