
НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 4 (77)

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

№ 4 (77)

2019

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Воевода А.А., Романников Д.О. Синтез регуляторов для многоканальных систем с использованием нейронных сетей.....	7
Воронин В.В., Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием топологических функций чувствительности.....	17
Grif A.M., Persova M.G., Soloveychik Y.G. Determination of the effect of injection wells on production wells in their work dynamics by using hydrodynamic modeling.....	31
Медведев М.Ю., Лазарев В.С. Метод формирования траектории для группы подвижных объектов с помощью кластеризации в двумерной среде.....	45
Тесля Н.Н., Чемоданов М.Н., Красильников П.Н. Коалиционная работа мобильных роботов и людей в социокберфизической системе на базе онтологического подхода.....	55
Тимофеев В.С., Исаева Е.В. Об оценивании функции плотности распределения случайной величины с использованием вейвлетов.....	71
Тимофеева А.Ю. Автоматический подбор опережающих индикаторов для прогнозирования состояния регионального рынка труда.....	85
Хабаров В.И., Степанов И.С., Серенко А.А. Контролируемый естественный язык для работы с онтологиями.....	99

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Наимов У.Р., Данилов С.Н. Алгоритм функционирования информационно-измерительной системы оценки координат беспилотных летательных аппаратов.....	121
Trushin V.A. The analysis of formant estimation method of the speech intelligibility as a method of performing indirect measurements.....	135

ЭНЕРГЕТИКА

Левин В.М., Сагалакова К.И., Яхья А.А. О проблемах в эксплуатации оборудования иностранного производства на объектах отечественной энергетики.....	147
Николаев М.Ю., Макаров В.В., Кропотин В.О., Грицай А.С., Гаак А.В. Повышение качества электроэнергии путем регулирования вентильных генераторов	161
Правила для авторов	177

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 18.12.2019. Выход в свет 20.12.2019.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 15,75. Печатных листов 11,25. Издательский № 296. Заказ № 274.
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

№ 4 (77)

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

Voskoboimikov 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

Lisitcina 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

№ 4 (77)

2019

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Voevoda A.A., Romannikov D.O. Synthesis of regulators for multichannel systems using neural networks	7
Voronin V.V., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnosis of continuous dynamic systems with the use of topological sensitivity functions	17
Grif A.M., Persova M.G., Soloveychik Y.G. Determination of the effect of injection wells on production wells in their work dynamics by using hydrodynamic modeling.....	31
Medvedev M.Yu., Lazarev V.S. A path planning method for a moving object group using clustering in a two-dimensional environment	45
Teslya N.N., Chemodanov M.N., Krasilnikov P.N. Coalition-Oriented Mobile Robot and People Operation in Social Cyber-Physical-Systems Based on the Ontological Approach.....	55
Timofeev V.S., Isaeva E.V. On the estimation of the distribution density function of a random variable using wavelets	71
Timofeeva A.Yu. Automatic selection of leading indicators for regional labor market forecasting	85
Khabarov V.I., Stepanov I.C., Serenko A.A. Controlled natural language for ontology editing...	99

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

Naimov U.R., Danilov S.N. An algorithm for information-measuring system functioning to assess coordinates of unmanned aerial vehicles.....	121
Trushin V.A. The analysis of the formant estimation method of speech intelligibility as a method of performing indirect measurements.....	135

POWER ENGINEERING

Levin V.M., Sagalakova K.I., Yahya A.A. On problems in the operation of foreign-made equipment at Russian energy facilities.....	147
Nikolaev M.Yu., Makarov V.V., Kropotin V.O., Gritsai A.S., Gaak A.V. Improvement of electric energy quality by regulating valve generators	161
Rules for authors	177

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 December 18, 2019.
Date of publication December 20, 2019. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 15,75. Printed pages 11,25.
Publishing number 296. Order number 274.

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 519.233.22

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-7-16

Синтез регуляторов для многоканальных систем с использованием нейронных сетей*

А.А. ВОЕВОДА^а, Д.О. РОМАННИКОВ^б

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

^а voevoda@ucit.ru ^б dmitry.romannikov@gmail.com

В статье рассматривается задача синтеза регулятора с использованием нейронных сетей на примере задачи стабилизации двухканального объекта. Объектом является трехмассовая система, в состав которой входят шесть интеграторов. Для управления объектом используются два входа и необходимо добиться стабилизации на двух выходных каналах. В поставленной задаче изначально объект находится в неустойчивом положении. В качестве регулятора используется нейронная сеть, которую предлагается обучать одним из методов обучения с подкреплением (в статье метод Deterministic Policy Gradient позволил получить наилучшие результаты). Поставленная задача рассматривается в двух вариациях. Особенность первой вариации заключается в доступности вектора состояния объекта. При этом, в отличие от классического способа решения синтеза регуляторов, входом нейронной сети, которая является регулятором, является вектор состояния объекта (значения интеграторов). Во второй вариации задачи мы считаем, что вектор состояния объекта недоступен и для его оценки используется наблюдатель, реализованный с использованием нейронной сети. Предлагается методика синтеза наблюдателя, а также структура нейронной сети наблюдателя, которая состоит из первого рекуррентного слоя и сети прямого распространения. Для обучения нейронной сети наблюдателя собраны данные путем серии экспериментов со схемой с параллельным подключением моделей объекта и наблюдателя и последующей подачи случайного закона управления на них. Приведены графики оценки состояния объекта и оценок наблюдателя. Нейронная сеть регулятора обучена для стабилизации из исходного неустойчивого состояния.

Ключевые слова: нейронные сети, синтез, классификация, структура нейронных сетей, методы обучения, машинное обучение, обратное распространение ошибки, структурные методы, алгоритмы управления

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение нейронных сетей для решения задач, связанных с разработкой искусственного интеллекта, приобрело большую популярность. В частности, они широко применяются для распознавания

* Статья получена 22 августа 2019 г.

объектов на изображениях [1], распознавания звуков и речи [2, 3] и в других задачах.

Ранее рассматривалась задачи синтеза структуры нейронной сети для статических задач: в [4] решалась задача построения нейронной сети для решения логико-арифметических задач, в [5] решалась задача синтеза нейронных сетей для реализации рекуррентного метода наименьших квадратов.

В статье рассматривается применение нейронных сетей для синтеза систем управления многоканальными объектами. При этом обучение исходной нейронной сети выполняется из изначального неустойчивого положения с использованием методов обучения с подтверждением. В качестве примера объекта используется трехмассовая система, состоящая из трех масс, последовательно соединенных пружинами [6].

Рассматривать вышепоставленную задачу будем с точки зрения использования метода обучения с подкреплением. В [7] предлагается для решения динамических систем использовать описание модели системы в терминах марковских цепей, где каждое состояние однозначно определяет состояние системы. Далее эта идея была неоднократно использована. В частности, в [8, 9] в качестве состояния использовалось изображение с экрана, в [10, 11] – с игровых досок.

Использование нейронных сетей для управления многократно предлагалось в разных статьях, например, в [12, 13], где основной идеей было обучение сети по предварительно собранным данным для переходного процесса или другими способами. Также в [14–16] предлагаются идеи подстройки коэффициентов регулятора, например, ПИД-регулятора или его модификаций с помощью нейронных сетей.

Задача формирования управляющего воздействия из начального произвольного состояния рассматривалась в статье¹, где предлагается способ приведения замкнутой системы к состоянию, когда возможна оптимизация с помощью модификации стоимостной функции (приведения ее к виду сходимости). Также стоит отметить, что в этой статье рассматривается задача оптимизации одноканального объекта.

Для решения задачи с непрерывным пространством действий, к которому относится рассматриваемая задача, в [17] предлагается использовать «актер-критик» метод (*Actor-Critic Method*), так как его легко модифицировать для работы с непрерывным пространством действий. В [18] предлагается использовать *Deterministic Policy Gradient*, так как, в отличие от предыдущего метода, он является *off-policy*, что позволяет накапливать буфер экспериментов и использовать их для обучения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье рассматривается задача синтеза системы управления трехмассовой системой, состоящей из трех масс m_1 , m_2 и m_3 , последовательно подвешенных через пружины с коэффициентами жесткости k_1 , k_2 и k_3 , в кото-

¹ А.А. Voevoda, D.O. Romannikov. Method for Numerical Optimization of the Parameters of Regulator from Unstable Condition // The 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019): proc., Tomsk, Russia, 14–17 October 2019.

рой два управляющих сигнала, силы u_1 и u_2 , приложены к массам m_1 , m_2 , а регулируемые величины – положение первого и второго грузов y_1 и y_2 . Вышеприведенное описание задачи более подробно рассмотрено в [6]. Координата третьего груза y_3 не измеряется. В качестве системы управления используется нейронная сеть прямого распространения, обучаемая при помощи методов обучения с подтверждением. Изначально система находится в неустойчивом состоянии. Для удобства моделирования передаточная функция объекта управления в непрерывном виде представлена в дискретном виде с частотой дискретизации 0.05. Тогда непрерывный интегратор $1/s$ будет представлен в виде передаточной функции $0.05/(z - 1)$. Структурная схема объекта представлена на рис. 1.

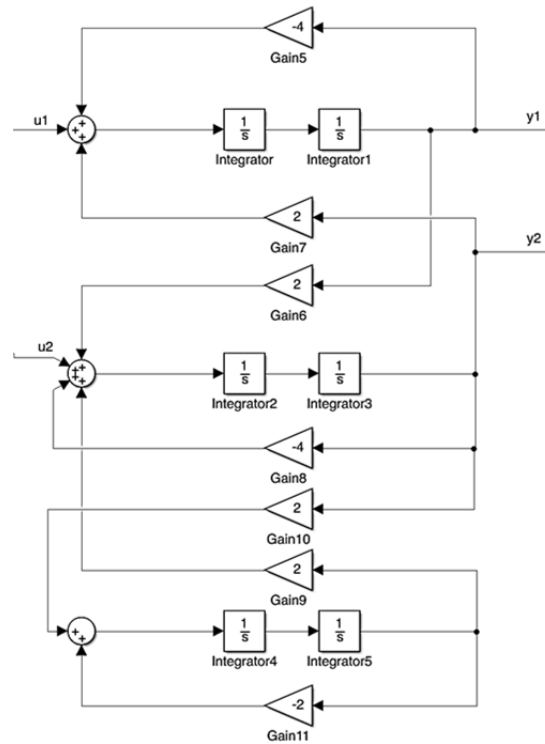


Рис. 1. Блок-схема объекта в непрерывном виде

Fig. 1. A continuous flow chart of an object

На рис. 1 представлен объект уже с конкретными значениями для масс и коэффициентов жесткости.

В [6] с помощью синтеза модальным методом рассчитывается регулятор, в котором в матрице обратной связи K_c содержится 12 коэффициентов, что соответствует 12 неизвестным переменным в случае оптимизации из неустойчивого начального состояния.

2. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА НА НЕЙРОННОЙ СЕТИ

По сравнению с классической схемой использования регулятора, где на его вход поступает сигнал ошибки и далее формируется управление, подаваемое далее на объект, при использовании нейронной сети в статье используется измененная схема (рис. 2).

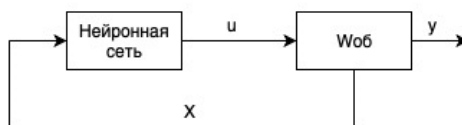


Рис. 2. Схема использования нейронной сети для регулирования объектом

Fig. 2. A diagram of neural network use for regulation by an object

На схеме, представленной на рис. 2, входом регулятора является состояние объекта, т. е. вектор значений задержек из объекта. Такое представление необходимо для того, чтобы однозначно определять состояние всей замкнутой системы и формировать управляющее воздействие.

Регулятор состоит из двух нейронных сетей: сеть «актера» для формирования управляющего воздействия. Нейронная сеть «актера» состоит из входного слоя размером в 6 нейронов (по числу задержек в объекте), первого скрытого слоя в 350 нейронов, второго скрытого слоя в 300 нейронов и выходного слоя в 2 нейрона. При этом в скрытых слоях используются функции активации выпрямителя *relu*, а в выходном слое – функции активации гиперболического тангенса *tanh* (вектор размерностью 2, так как объект двухканальный). Вторая сеть, «критик», необходима для оценки значений $Q(s, a)$ [9]. Нейронная сеть «критика» состоит из входного слоя в 6 нейронов (по числу задержек в объекте). Первый скрытый слой, состоящий из 402 нейронов (400 нейронов соединены с входным слоем, а еще на два поступают значения сигналов управления), в выходном слое представляет один нейрон. В скрытом слое используется функция активации *relu*, в выходном слое функция активации не используется.

В качестве функции награды используется функция $R = \sum_i v_i - |v_i - y_i|$,

где v_i – требуемое значение на i -м канале, а y_i – выход объекта на i -м канале. Также с практической точки зрения оказалось эффективным дополнительно увеличивать награду ближе к требуемому значению, например, умножение значения награды, если она находится в диапазоне $\pm 10\%$ от v .

Обучение нейронной сети выполнено за 300 тысяч эпох с максимальным полученным размером награды в 1870. При обучении длина переходного процесса ограничивалась 100 тактами, что соответствует пяти секундам (по 0.05 секунды на такт) для уменьшения времени обучения (рис. 3).

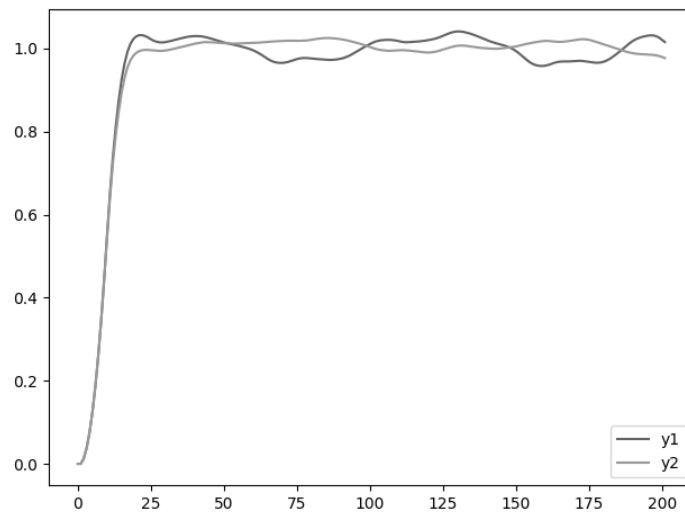


Рис. 3. Переходный процесс по двум каналам регулируемого объекта

Fig. 3. A transient process along two channels of the regulated object

3. РЕАЛИЗАЦИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Часто нет возможности снять с реального объекта вектор состояния. В этих случаях принято использовать наблюдатели, которые позволяют сделать оценку вектора состояния. Для реализации наблюдателя с помощью нейронных сетей предлагается использовать сеть прямого распространения, в которой на вход подается сигнал с выхода объекта y и сигнал управления u , а на выходе – оценка состояния объекта x' (рис. 4). Интерес представляет первый слой нейронной сети наблюдателя, в котором для реализации аналога задержки $1/z$ в объекте $W_{об}$ используется рекуррентный слой, в котором значение нейронов передаются последовательно для входов с y и u . В остальном нейронная сеть наблюдателя является сетью прямого распространения с 24 нейронами в первом слое, 400 – во втором и 300 – в третьем.

Обучение нейронной сети наблюдателя (рис. 4) можно выполнять отдельно. Для этого достаточно собрать данные при моделировании состояния объекта и нейронной сети наблюдателя согласно схеме на рис. 5.

На рис. 5 генератор управления синтезирует случайное управление в ограниченном диапазоне, которое поступает на реальный объект и на нейронную сеть наблюдателя. Для сбора данных для обучения выполнялась серия моделирований для получения реального состояния объекта x и выхода нейронной сети x' . В статье для обучения наблюдателя значения управления были ограничены диапазоном $\{-4, 4\}$, также серия моделирования останавливалась при выходе значений выходного сигнала объекта из диапазона $\{-5, 5\}$. Собранные данные используются для обучения нейронной сети наблюдателя со стоимостной функцией средней квадратичной ошибки.

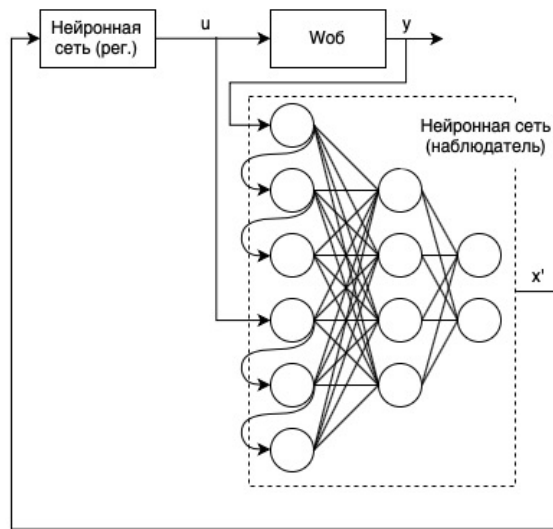


Рис. 4. Схема использования нейронных сетей для регулирования с наблюдателем

Fig. 4. A diagram of neural network use for regulation with the observer

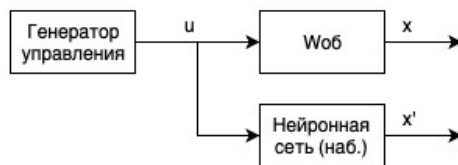


Рис. 5. Схема для сбора данных для обучения нейронной сети наблюдателя

Fig. 5. A diagram of data collection to train the observer's neural network

Графики значений переменных состояния объекта обученного наблюдателя приведены на рис. 6.

Таким образом, можно сформулировать основные аспекты реализации наблюдателя с использованием нейронных сетей.

1. Нейронная сеть наблюдателя может быть прямого распространения с рекуррентным первым слоем. При этом на вход подается последовательность из значений каждого выхода объекта и каждого из входов.

2. Для обучения нейронной сети наблюдателя необходимо собрать данные, используя схему с параллельным подключением объекта и нейронной сети наблюдателя к генератору случайного управления, при этом задав критерии останова для эксперимента и границы сигнала генератора.

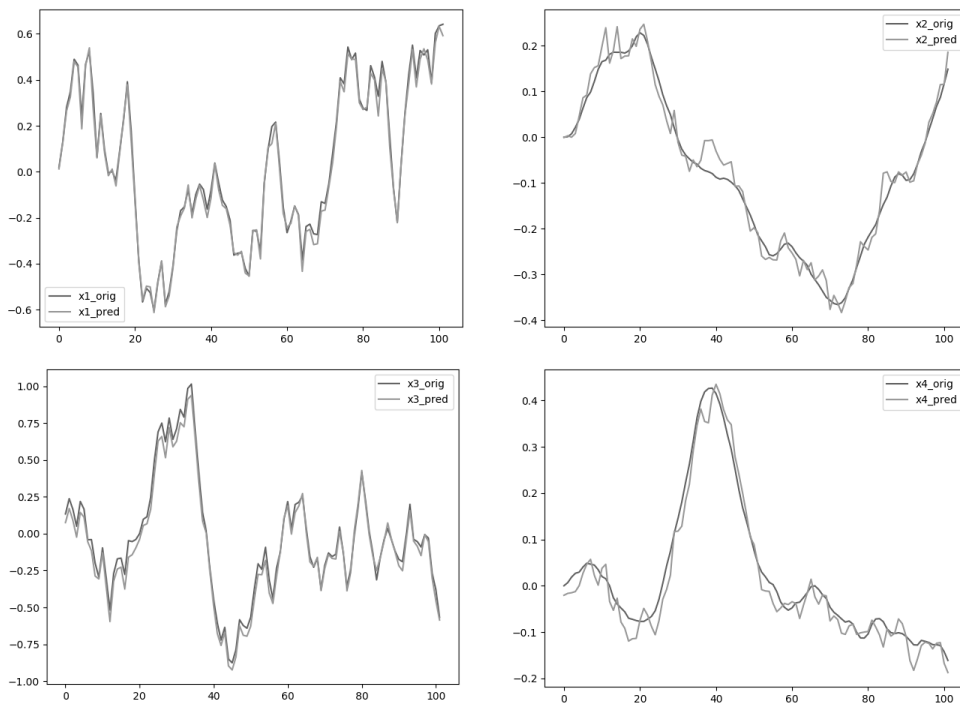


Рис. 6. Графики значений переменных состояния объекта

Fig. 6. Graphs of values of the object state variables

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассматривается процедура синтеза нейронного регулятора на примере двухканального объекта трехмассовой системы. Также частью задачи было использование методов обучения с подкреплением для обучений нейронной сети регулятора из начального неустойчивого положения, в котором находился объект, с целью стабилизации значений выходов объекта в диапазоне уставки. Рассмотрено два случая: с доступным вектором состояния и оценкой состояния объекта, полученного с наблюдателя. При обоих вариантах вектор состояния объекта (или оценка) подается на вход нейронной сети регулятора и далее выполняется ее обучение с использованием метода *Deterministic Policy Gradient*. Для реализации наблюдателя используется нейронная сеть прямого распространения, в которой первый слой заменен на рекуррентный. На вход нейронной сети наблюдателя подается последовательность значений объекта и выходных значений объекта. Для обучения наблюдателя предложена схема сбора данных, в которой на нейронную сеть (изначально необученную) и объект подаются сигналы управления, сформированные с помощью генератора случайных чисел, а на выходе нейронной сети формируется оценка состояния объекта. Также данные о требуемом состоянии объекта берутся с модели объекта.

Направлениями дальнейшего исследования является усложнение объекта, в частности добавление в него нелинейностей, а также формулирование более формальных рекомендаций по выбору структуры нейронной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E.* ImageNet classification with deep convolutional neural networks // *Advances in Neural Information Processing Systems 25 (NIPS 2012)*. – Lake Tahoe, Nevada, 2012. – P. 1090–1098.
2. *Graves A., Mohamed A., Hinton G.* Speech recognition with deep recurrent neural networks // *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2013*. – Vancouver, Canada, 2013. – P. 6645–6649.
3. *Deng L., Hinton G.E., Kingsbury B.* New types of deep neural network learning for speech recognition and related applications: an overview // *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2013*. – Vancouver, Canada, 2013. – P. 8599–8603.
4. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Синтез нейронной сети для решения логико-арифметических задач // *Труды СПИИРАН*. – 2017. – Вып. 54. – С. 205–223.
5. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Синтез нейронной сети для реализации рекуррентного метода наименьших квадратов // *Научный вестник НГТУ*. – 2018. – № 72. – С. 33–42.
6. *Воевода А.А., Шоба Е.В.* Стабилизация трехмассовой системы: модальный метод синтеза в пространстве состояний с наблюдателем пониженного порядка // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2010. – № 4 (62). – С. 13–24.
7. *Sutton R., Barto A.* Reinforcement learning: an introduction. – Cambridge: MIT Press, 2018. – 1328 p.
8. Playing Atari with deep reinforcement learning / V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra, M. Riedmiller // *NIPS Deep Learning Workshop*. – Lake Tahoe, 2013.
9. Learning from demonstrations for real world reinforcement learning / T. Hester, M. Vecerik, O. Pietquin, M. Lanctot, T. Schaul, B. Piot, D. Horgan, J. Quan, A. Sendonaris, G. Dulac-Arnold, I. Osband, J. Agapiou, J.Z. Leibo, A. Gruslys // *Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI'16*. – Phoenix, Arizona, 2016. – P. 2094–2100.
10. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search / D. Silver, A. Huang, C. Maddison, A. Guez, L. Sifre, G. Driessche, J. Schrittwieser, I. Antonoglou, V. Panneershelvam, M. Lanctot, S. Dieleman, D. Grewe, J. Nham, N. Kalchbrenner, I. Sutskever, T. Lillicrap, M. Leach, K. Kavukcuoglu, T. Graepel, D. Hassabis // *Nature*. – 2016. – Vol. 529. – P. 484–503.
11. *Omid E., Netanyahu N., Wolf L.* DeepChess: end-to-end deep neural network for automatic learning in chess // *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2016: 25th International Conference on Artificial Neural Networks: proceedings*. – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – Pt. 2. – P. 88–96.
12. Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И.М. Макарова и В.М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
13. *Белов М.П., Чан Д.Х.* Интеллектуальный контроллер на основе нелинейного оптимального управления роботами-манипуляторами // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. – 2018. – № 9. – С. 76–86.
14. Neural network-based self-tuning PID control for underwater vehicles / R. Alvarado, L. Valdovinos, T. Salgado-Jiménez, A. Gómez-Espinosa, F. Fonseca-Navarro // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16 (9). – P. 1429.
15. *Kumar R., Srivastava S., Gupta J.R.P.* Artificial Neural Network based PID controller for online control of dynamical systems // *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. – Delhi, 2016.
16. *Zribi A., Chtourou M., Djemel M.* A new PID neural network controller design for nonlinear processes [Electronic resource]. – URL: <http://arxiv.org/abs/1512.07529> (accessed: 05.12.2019).
17. *Wawrzynski P.* A simple actor-critic algorithm for continuous environments // *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*. – Miedzyzdroje, Poland, 2004. – P. 1143–1149.
18. Deterministic policy gradient algorithms / D. Silver, G. Lever, N. Heess, T. Degris, D. Wierstra, M. Riedmiller // *Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning, ICML'14*. – 2014. – Vol. 32. – P. 387–395.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматки Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: полиномиальный синтез, сети Петри, UML-диаграммы. Число научных публикаций – более 200. E-mail: voevoda@ucit.ru

Романников Дмитрий Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: Машинное обучение, нейронные сети, сети Петри. Число научных публикаций: 51. E-mail: dmitry.romannikov@gmail.com

Voevoda Alexandr Alexandrovich, D.Sc. (Eng.), a professor at the automation department, Novosibirsk State Technical University. His research interests include polynomial synthesis, the Petri nets and UML diagrams. He is the author of more than 200 publications. E-mail: voevoda@ucit.ru;

Romannikov Dmitry Olegovich, PhD (Eng.), an associate professor at the automation department, Novosibirsk State Technical University. The field of his research covers machine learning, neural networks and the Petri nets. He is the author of 51 publications. E-mail: dmitry.romannikov@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-7-16

Synthesis of regulators for multichannel systems using neural networks*

A.A. VOEVODA^a, D.O. ROMANNIKOV^b

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a voevoda@ucit.ru ^b dmitry.romannikov@gmail.com

Abstract

The article considers the problem of regulator synthesis using neural networks on the example of the problem of two-channel object stabilization. The object is a three-mass system which includes six integrators. Two inputs are used to control the facility and stabilization must be achieved on two output channels. In the task at hand, the object is initially in an unstable position. A neural network which is proposed to be trained using one of the reinforcement learning methods is used as a regulator. The Deterministic Policy Gradient method allowed us to obtain the best results. The task in question is considered in two versions. The peculiarity of the first version is the availability of the object state vector. In this case, in contrast to the classical method for solving the problem of regulator synthesis, the input of the neural network, which is the regulator, is the state vector of the object (integrator values). In the second version of the problem, we believe that the state vector of the object is unavailable and an observer implemented by a neural network is used to evaluate it. An observer synthesis technique is proposed, as well as the structure of the observer's neural network, which consists of the first recurrent layer and further the direct distribution network. To train the observer's neural network, data was collected through a series of experiments with a circuit with a parallel connection of the models of the object and the observer and a subsequent application of a random control law to them. Graphs for assessing the object state and the observer's estimates are given. The controller neural network is trained to stabilize from the initial unstable state. The article ends with conclusions and considerations concerning further research.

Keywords: neural networks, synthesis, classification, structure of neural networks, training methods, machine learning, back propagation errors, structural methods, control algorithms

REFERENCES

1. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems 25 (NIPS 2012)*, Lake Tahoe, Nevada, 2012, pp. 1097–1105.
2. Graves A., Mohamed A., Hinton G. Speech recognition with deep recurrent neural networks. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2013*, Vancouver, Canada, 2013, pp. 6645–6649.
3. Deng L., Hinton G.E., Kingsbury B. New types of deep neural network learning for speech recognition and related applications: an overview. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2013*. Vancouver, Canada, 2013, pp. 8599–8603.

* Received 22 August 2019.

4. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Sintez neironnoi seti dlya resheniya logiko-arifmeticheskikh zadach [Synthesis of neural network for solving logical-arithmetic problems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS proceedings*, 2017, vol. 54, no. 5, pp. 205–223.
5. 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 least-squares method]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 72, pp. 33–42.
6. Voevoda A.A., Shoba E.V. Stabilizatsiya trekhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza v prostranstve sostoyanii s nablyudatelem ponizhennogo poryadka [Stabilisation of three-mass system: a modal method of synthesis in state space with reduced-order observer]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 4 (62), pp. 13–24.
7. Sutton R., Barto A. *Reinforcement learning: an introduction*. Cambridge, MIT Press, 2018. 1328 p.
8. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Graves A., Antonoglou I., Wierstra D., Riedmiller M. Playing Atari with deep reinforcement learning. *NIPS Deep Learning Workshop*, Lake Tahoe, 2013.
9. Hester T., Vecerik M., Pietquin O., Lanctot M., Schaul T., Piot B., Horgan D., Quan J., Sendonaris A., Dulac-Arnold G., Osband I., Agapiou J., Leibo J.Z., Gruslys A. Learning from demonstrations for real world reinforcement learning. *Proceeding of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI'16*, Phoenix, Arizona, 2016, pp. 2094–2100.
10. Silver D., Huang A., Maddison C., Guez A., Sifre L., Driessche G., Schrittwieser J., Antonoglou I., Panneershelvam V., Lanctot M., Dieleman S., Grewe D., Nham J., Kalchbrenner N., Sutskever I., Lillicrap T., Leach M., Kavukcuoglu K., Graepel T., Hassabis D. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 2016, vol. 529, pp. 484–503.
11. Omid E., Netanyahu N., Wolf L. DeepChess: end-to-end deep neural network for automatic learning in chess. *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2016: 25th International Conference on Artificial Neural Networks: proceedings*. Springer International Publishing Switzerland, 2016, pt. 2, pp. 88–96.
12. Makarov I.M., Lokhin V.M., eds. *Intellektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Intelligent automatic control systems]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 576 p.
13. Belov M.P., Chan D.Kh. Intellektual'nyi kontroller na osnove nelineinogo optimal'nogo upravleniya robotami-manipulyatorami [Intelligent controller based on non-linear optimal control of robotic manipulators]. *Izvestiya SPbGETU "LETI" – Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2018, no. 9, pp. 76–86.
14. Alvarado R., Valdovinos L., Salgado-Jiménez T., Gómez-Espinosa A., Fonseca-Navarro F. Neural network-based self-tuning PID control for underwater vehicles. *Sensors*, 2016, vol. 16 (9), p. 1429.
15. Kumar R., Srivastava S., Gupta J.R.P. Artificial Neural Network based PID controller for online control of dynamical systems. *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Delhi, 2016.
16. Zribi A., Chtourou M., Djemel M. *A new PID neural network controller design for nonlinear processes*. Available at: <http://arxiv.org/abs/1512.07529> (accessed 05.12.2019).
17. Wawrzynski P. A simple actor-critic algorithm for continuous environments. *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, Poland*, 2004, pp. 1143–1149.
18. Silver D., Lever G., Heess N., Degris T., Wierstra D., Riedmiller M. Deterministic policy gradient algorithms. *Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning, ICML'1432*, 2014, vol. 32, pp. 387–395.

Для цитирования:

Воевода А.А., Романников Д.О. Синтез регуляторов для многоканальных систем с использованием нейронных сетей // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 7–16. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-7-16.

For citation:

Voevoda A.A., Romannikov D.O. Sintez regulatorov dlya mnogokanal'nykh sistem s ispol'zovaniem neironnykh setei [Synthesis of regulators for multichannel systems using neural networks]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 7–16. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-7-16.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 681.518.5

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-17-30

Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием топологических функций чувствительности*

В.В. ВОРОНИН^а, С.В. ШАЛОБАНОВ^б, С.С. ШАЛОБАНОВ^с

680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Тихоокеанский государственный университет

^а 004183vzv@mail.ru ^б shalobanov@mail.ru ^с shalobanov_ne@mail.ru

В работе рассмотрен алгоритм поиска дефектов топологических связей между динамическими блоками, позволяющий полнее учесть специфику проявления реального одностороннего дефекта – обрыва одной связи между динамическими блоками передаточной функции объекта диагностирования. Применение известных алгоритмов подобного рода осложняется необходимостью использования моделей с пробными отклонениями параметров, либо необходимостью анализа знаков передач выходных сигналов, либо сменой позиции входного сигнала. Недостатком алгоритма на основе пробных изменений топологических связей модели является то, что он использует задание этих изменений в моделях с пробными отклонениями, что является трудоемкой задачей. Недостатком алгоритма с анализом знаков передач выходных сигналов с использованием нормированного диагностического признака, а также с использованием бинарного диагностического признака является то, что необходимы дополнительные вычисления знаков передач выходных сигналов от динамических блоков передаточной функции до контрольных точек. Недостатком алгоритма со сменой позиции входного сигнала является то, что он использует перемещение места подачи входного сигнала на другую позицию в моделях, контролирующей топологическую связь. Ниже рассматривается алгоритм поиска дефектов в виде нарушения связей между динамическими блоками передаточной функции, основанный на использовании модели топологической чувствительности с помощью интегральных оценок выходных сигналов объекта диагностирования. Топологическая чувствительность может быть получена с использованием структурно-матричной динамической модели. Такой подход упрощает реализацию алгоритма путем уменьшения числа контрольных точек, что позволяет сократить аппаратные и временные затраты при диагностировании сложных объектов. Определена процедура получения нормированных диагностических признаков и вычисления количественной меры различимости дефектов.

* Статья получена 10 сентября 2019 г.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00737).

Ключевые слова: поиск дефектов, непрерывная система с обратной связью, передаточная функция динамического блока, топологическая функция чувствительности, диагностическая модель, объект диагностирования, контрольные точки, интегральные оценки выходных сигналов, нормированный диагностический признак, различимость дефектов

ВВЕДЕНИЕ

Динамические модели стационарных непрерывных линейных систем управления строятся как с помощью графоаналитического описания с использованием структурных схем [1, 2], так и путем описания их в пространстве состояний [3, 4]. Метод пространства состояний применим в программировании на ЭВМ, так как использует вычислительные методы линейной алгебры и матричное представление систем. Между тем в описанной при помощи передаточных функций системе всегда есть определенный произвол в выборе переменных состояния. Передаточной функции системы соответствует несколько представлений в пространстве состояний, и первая определяется однозначным образом. Если известна модель последней в пространстве состояний, это говорит о том, что описание системы является в нем более общим. Меньшая размерность n вектора переменных, динамические свойства отдельных блоков и отражение межблочных связей (топологических особенностей) является удобством графоаналитического представления объекта диагностирования ОД [5–7].

Данные диагностические модели удобно применять при разработке структурных методов поиска дефектов, поскольку они имеют достоинства методов пространства состояний (использование методов линейной алгебры, матричное представление) и графоаналитического представления (отображение блочных связей) [8–10].

1. АЛГОРИТМ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ

Алгоритм поиска дефектов с глубиной до структурной связи между динамическими блоками основан на определении отклонений выходных сигналов объекта диагностирования от сигналов номинальной модели [11–13]:

$$DF_j(\alpha) = F_j(\alpha) - F_{j\text{ном}}(\alpha), \quad j=1, \dots, k; \quad \alpha = S/T_k,$$

где j – номер контрольной точки; k – число контрольных точек; $F_j(\alpha)$ и $F_{j\text{ном}}(\alpha)$ – сигналы объекта и модели соответственно в j -й контрольной точке; T_k – время контроля.

Пусть система состоит из n блоков с передаточными функциями W_1, W_2, \dots, W_n . Обозначим V – входное воздействие, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – векторы выходных и входных сигналов блоков соответственно. Пусть также задан порядок соединения блоков в диагностической модели. Тогда структурно-топологические особенности системы однозначно определяются структурно-матричной схемой, представленной на рис. 1.

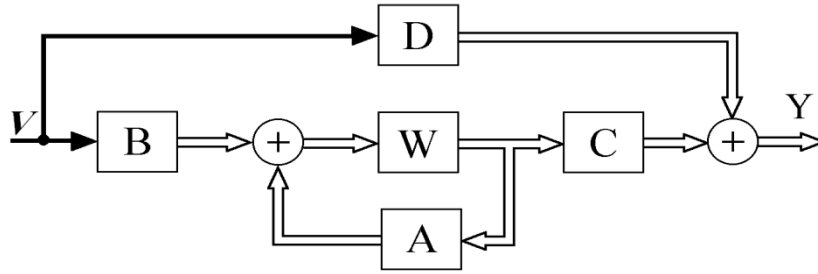


Рис. 1. Полная структурно-матричная модель ОД

Fig. 1. A complete structural-matrix model of the diagnosis object (DO)

В модели введены следующие обозначения:

V – скалярный входной сигнал ОД;

$B = (b_1, \dots, b_n)^T$ – вектор преобразования входного сигнала V ;

$W = \begin{bmatrix} W_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & W_n \end{bmatrix}$ – диагональная матрица передаточных функций

блоков ОД;

$A = [a_{ij}]$ – $(n \times n)$ -матрица топологии ОД, где a_{ij} принимает значения из множества $\{-1, 0, 1\}$ и определяет наличие и знак связи выходного сигнала j -го блока со входом i -го блока;

$C = \begin{bmatrix} E \\ P \end{bmatrix}$ – $(n + s \times n)$ -матрица преобразования сигналов, где s – число сумматоров в ОД, верхний блок E – единичная матрица, P – $(s \times n)$ -матрица, элемент p_{ij} которой определяет наличие и знак связи выходного сигнала j -го блока с i -м сумматором;

$D = \begin{bmatrix} O \\ G \end{bmatrix}$ – $(n + s \times 1)$ -вектор, O – нулевой блок, G – $(s \times 1)$ -вектор, компонент g_i которого определяет наличие и знак связи входа V с i -м сумматором.

При таком представлении элементы вектора выходных сигналов Y представляют собой все $n + s$ сигналов ОД. Структурно-матричная модель определяет соотношение между вектором выходных сигналов Y и входным сигналом V (1):

$$Y = (C[E - WA]^{-1}WB + D)V, \quad (1)$$

откуда вектор передаточных функций

$$\Phi = \frac{Y}{V} = C[E - WA]^{-1}WB + D = C[W^{-1} - A]^{-1}B + D. \quad (2)$$

Модель топологической чувствительности определяется дифференцированием выражения (2) по связи между i -м и j -м блоками:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_{ij}} = C[W^{-1} - A]^{-1} A'_{ij}[W^{-1} - A]^{-1} B,$$

где A'_{ij} – производная матрицы A по связи (i, j) .

Модель чувствительности получают следующим образом. Поочередно, для каждой из m связей всех блоков динамической системы соединяют перемычкой две модели: на вход первой модели подают тестовый сигнал V , выходом первой модели определяют выход i -го блока (начало рассматриваемой топологической связи), выход первой модели соединяют со входом второй аналогичной модели, входом второй модели определяют вход j -го блока (окончание контролируемой топологической связи) (рис. 2). Модель топологической чувствительности может быть представлена в виде соединения двух моделей, связанных перемычкой.

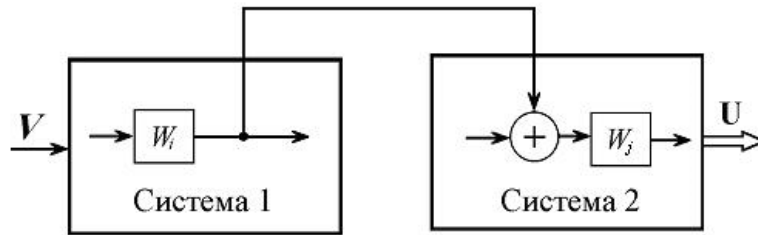


Рис. 2. Модель топологической функции чувствительности

Fig. 2. A model of the topological function of sensitivity

В процессе диагностирования регистрируют интегральные оценки выходных сигналов моделей топологической чувствительности:

$$U(\alpha)_{ji}, \quad j = 1, \dots, k, \quad i = 1, \dots, m,$$

где $U(\alpha)_{ji}$ – чувствительность передаточной функции объекта диагностирования к изменению i -й связи для j -й контрольной точки; m – число рассматриваемых топологических связей.

Выходные сигналы моделей чувствительности (2) являются топологическими функциями чувствительности U . Выражения (1) и (2) позволяют вычислить элементы векторов ΔF и U , размерность которых определяется количеством контрольных точек. Диагностический признак наличия топологического дефекта определяется формулой

$$J_i = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \frac{U_{ji}(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k U_{ni}^2(\alpha)}} \frac{\Delta F_j(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k \Delta F_n^2(\alpha)}} \right]^2, \quad i = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Для нормированных векторов $\Delta\hat{F}$ и \hat{U} формула (3) запишется в виде

$$J_i = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \hat{U}_{ji}(\alpha) \cdot \Delta\hat{F}_j(\alpha) \right]^2, \quad i = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где

$$\Delta\hat{F}_j(\alpha) = \frac{F_j(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k \Delta F_n^2(\alpha)}}, \quad (5)$$

$$\hat{U}_{ji}(\alpha) = \frac{U_{ji}(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k U_{ni}^2(\alpha)}}, \quad (6)$$

где m – число рассматриваемых изменений связей для функции топологической чувствительности; k – число отклонений выходных сигналов объекта диагностирования от сигналов номинальной модели на интервале контроля T_k [14–16].

Топологическая связь, для которой диагностический признак (3) или (4) принимает минимальное значение, считается дефектной.

Диагностические признаки (3) и (4) лежат в фиксированном интервале значений $[0, 1]$, поэтому различимость двух топологических дефектов может оцениваться как разность значений соответствующих признаков.

Графическая интерпретация диагностического признака заключается в следующем: поскольку в квадратных скобках выражения (4) записано скалярное произведение двух векторов единичной длины размерностью k (k – число контрольных точек), то выражение в квадратных скобках есть косинус угла между этими векторами. Следовательно, выражение (4) можно заменить выражением

$$J_i = 1 - \cos^2 \varphi_i = \sin^2 \varphi_i,$$

где φ_i – угол между вектором единичной длины интегральных оценок отклонений сигналов объекта диагностирования от номинальных и вектором единичной длины интегральных оценок выходных сигналов модели чувствительности i -й связи.

Фактическая различимость i -го топологического дефекта определяется как

$$\Delta J_i = J_k - J_i,$$

где J_i – значение признака i -го присутствующего в объекте топологического дефекта; J_k – значение ближайшего к нему по величине признака.

Функциональная схема устройства, реализующего вычисление диагностического признака наличия топологического дефекта с использованием топологической функции чувствительности (3), приведена на рис. 3.

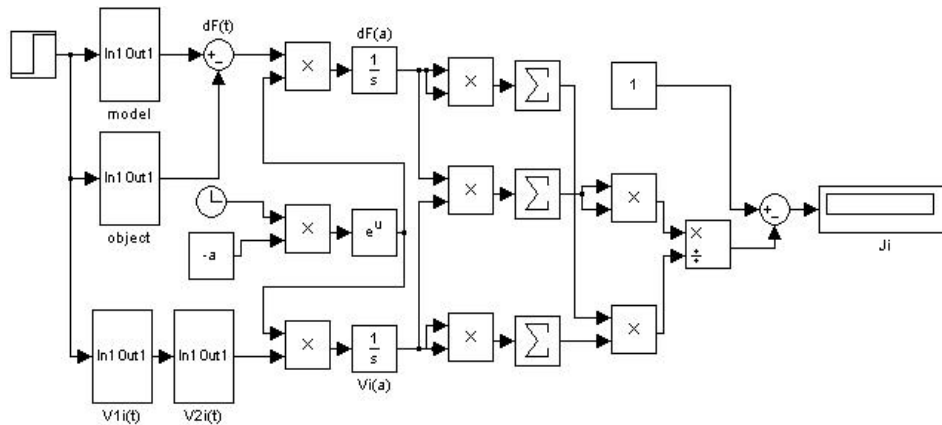


Рис. 3. Функциональная схема устройства поиска дефектов с использованием топологической функции чувствительности

Fig. 3. A functional diagram of a defect search unit with the use of the topological function of sensitivity

Поиск неисправной топологической связи согласно предлагаемому алгоритму сводится к выполнению следующих операций.

1. В качестве динамической системы рассматривают систему, состоящую из произвольно соединенных динамических элементов, передаточные функции которых в сумме содержат m топологических связей.

2. Предварительно определяют время контроля $T_k \geq T_{\text{ПП}}$, где $T_{\text{ПП}}$ – время переходного процесса системы. Время переходного процесса оценивают для номинальных значений параметров динамической системы.

3. Определяют параметр интегрального преобразования сигналов из соотношения $\alpha = 5/T_k$ [17–19].

4. Фиксируют число контрольных точек k [20–22].

5. Предварительно определяют векторы $\hat{U}(\alpha)$ интегральных оценок выходных сигналов модели, полученные в результате функций чувствительности i -й межблочной связи каждой из m топологических связей всех блоков, для чего выполняют пункты 6–9.

6. Подают тестовый сигнал V (единичный ступенчатый, линейно возрастающий, прямоугольный импульсный и т. д.) на вход системы управления с номинальными характеристиками. Принципиальных ограничений на вид входного тестового воздействия предлагаемый способ не предусматривает.

7. Регистрируют реакцию системы с номинальными характеристиками $f_{j\text{ном}}(t)$, $j=1, \dots, k$, на интервале $t \in [0, T_k]$ в k контрольных точках и определяют интегральные оценки выходных сигналов $F_{j\text{ном}}(a)$, $j=1, \dots, k$, системы. Для этого в момент подачи тестового сигнала на вход системы управления с номинальными характеристиками одновременно начинают интегрирование сигналов системы управления в каждой из k контрольных

точек с весами $e^{-\alpha t}$, где $\alpha = 5 / T_k$. Для этого сигналы системы управления подают на первые входы k блоков перемножения, на вторые входы блоков перемножения подают экспоненциальный сигнал $e^{-\alpha t}$, выходные сигналы k блоков перемножения подают на входы k блоков интегрирования, интегрирование завершают в момент времени T_k , полученные в результате интегрирования оценки выходных сигналов $F_{j\text{ном}}(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$, регистрируют.

8. Определяют интегральные оценки выходных сигналов модели для каждой из k контрольных точек, полученные в результате использования топологической функции чувствительности. Для этого поочередно для каждой из m топологических связей блоков динамической системы соединяют топологической связью две модели: на вход первой модели подают тестовый сигнал $x(t)$; выходом первой модели фиксируют выход блока, к которому подключена рассматриваемая топологическая связь; соединяют выход первой модели со входом второй; входом второй модели фиксируют вход блока, к которому подключена рассматриваемая топологическая связь; снимают выходные сигналы для каждой контрольной точки второй модели; полученные выходные сигналы для каждой из k контрольных точек и каждой из m составных моделей с топологической функцией чувствительности $U(\alpha)_{ji}$, $j = 1, \dots, k$; $i = 1, \dots, m$, регистрируют.

9. Определяют нормированные значения интегральных оценок выходных сигналов модели, полученные в результате использования топологической функции чувствительности соответствующих межблочных связей по формуле

$$\hat{U}_{ji}(\alpha) = \frac{U_{ji}(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k U_{ni}^2(\alpha)}}.$$

10. Замещают систему с номинальными характеристиками контролируемой. На вход системы подают аналогичный тестовый сигнал $x(t)$.

11. Определяют интегральные оценки выходных сигналов контролируемой системы для k контрольных точек $F_j(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$, осуществляя операции, описанные в пунктах 6 и 7 применительно к контролируемой системе.

12. Определяют отклонения интегральных оценок выходных сигналов контролируемой системы для k контрольных точек от номинальных значений $\Delta F_j(\alpha) = F_j(\alpha) - F_{j\text{ном}}(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$.

13. Вычисляют нормированные значения отклонений выходных сигналов контролируемой системы от номинальных по формуле

$$\Delta \hat{F}_j(\alpha) = \frac{\Delta \hat{F}_j(\alpha)}{\sqrt{\sum_{n=1}^k \Delta \hat{F}_n(\alpha)}}.$$

14. Вычисляют диагностические признаки наличия неисправной топологической связи блоков по формуле

$$J_i = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \hat{U}_{ji}(\alpha) \cdot \Delta \hat{F}_j(\alpha) \right]^2, \quad i = 1, \dots, m.$$

15. По минимуму значения диагностического признака определяют топологический дефект.

Покажем, что данный алгоритм позволяет находить дефекты топологических связей между соответствующими блоками.

2. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА

Рассмотрим реализацию предлагаемого алгоритма поиска одиночного топологического дефекта для системы, структурная схема которой представлена на рис. 4 и является моделью системы стабилизации давления газа на установке прямотрубной печи для подогрева нефтепродуктов нефтеперерабатывающего завода.

Передаточные функции блоков, входящих в объект диагностирования, следующие:

$$W_1 = \frac{k_1}{T_1 s + 1}; \quad W_2 = \frac{k_2}{s(T_2 s + 1)}; \quad W_3 = \frac{k_3 s}{T_3 s + 1}; \quad W_4 = e^{-s\tau}; \quad W_5 = \frac{k_5}{T_5 s + 1}.$$

В системе реализован ПИД закон регулирования (блоки № 1–3). Исполнительное устройство, представляющее собой электрический вентиль, объект регулирования (зона трубопровода между вентилем и датчиком) и датчик давления представлены в модели динамическими элементами № 4 и 5. Значения коэффициентов усиления в относительных единицах и постоянных времени: $K_1 = 4.5$; $K_2 = 4$; $K_3 = 0.5$; $\tau = 0.1$ с; $K_5 = 1$; $T_1 = T_2 = T_3 = 0.1$ с; $T_5 = 1$ с.

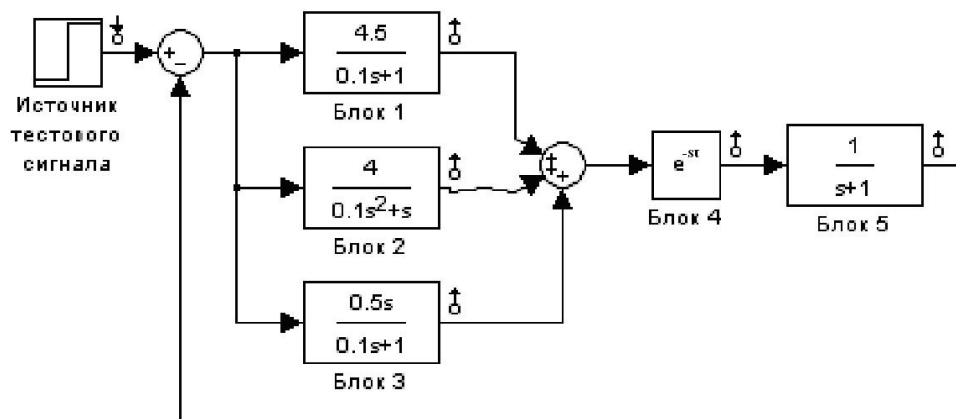


Рис. 4. Структурная схема объекта диагностирования

Fig. 4. A structural diagram of the diagnosis object

Объект диагностирования имеет длительность переходного процесса $T_{п.п} = 2$ с. Поэтому наибольшие значения фактической различимости получены при использовании времени контроля $T_k = 2$ с. Будем использовать единичное ступенчатое входное воздействие и множество контрольных точек, которые практически возможно организовать в объекте, т. е. четыре контрольные точки на выходе первого, второго, третьего и пятого блоков.

Применение алгоритма поиска одиночного топологического дефекта в связи № 5 (обрыв связи между блоком № 5 и входом регулятора) при использовании множества контрольных точек $\{1, 2, 3, 5\}$ дает следующие значения нормированных диагностических признаков:

$$J_1 = 0.962; J_2 = 0.799; J_3 = 0.935; J_5 = \mathbf{0.002}.$$

Моделирование процессов поиска топологических дефектов в ПИД-регуляторе данного объекта диагностирования при тех же условиях диагностирования дает следующие значения диагностических признаков.

При наличии дефекта в связи № 1 (обрыв связи между первым и четвертым блоком) алгоритм дает следующие результаты:

$$J_1 = \mathbf{0.004}; J_2 = 0.076; J_3 = 0.26; J_5 = 0.956.$$

При наличии дефекта в связи № 2 (обрыв связи между вторым и четвертым блоком) получим значения признаков:

$$J_1 = 0.13; J_2 = \mathbf{0.003}; J_3 = 0.562; J_5 = 0.787.$$

При наличии дефекта в связи № 3 (обрыв связи между третьим и четвертым блоком) получим значения признаков:

$$J_1 = 0.15; J_2 = 0.424; J_3 = \mathbf{0.013}; J_5 = 0.961.$$

Минимальное значение диагностического признака во всех случаях правильно указывает на дефектную топологическую связь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый алгоритм поиска одиночных топологических дефектов непрерывных САУ во временной области на основе топологической функции чувствительности, использующий интегральные оценки выходных сигналов, значительно улучшающий эффективность диагностирования за счет увеличения различимости, по сравнению с алгоритмом, использующим временные характеристики сигналов. В работе рассматривается подход, позволяющий упростить получение информации о модели топологической чувствительности. Рассматриваются нормированные диагностические признаки топологических дефектов, позволяющие проводить сравнение результатов диагностирования в различных режимах.

Структурно-матричная модель топологической чувствительности удобней моделей, представленных в виде дифференциальных уравнений и пространства состояний, так как использует не дифференциальные, а интегральные уравнения, поэтому диагностическая модель позволяет производить анализ технического состояния во временной области и обладает структурно-топологической чувствительностью отдельных параметров на уровне динамического элемента объекта диагностирования.

Алгоритм поиска одиночных дефектов с глубиной до топологической связи ОД, учитывающий специфику влияния конкретных конструктивных дефектов на изменение динамических характеристик объекта диагностирования. Показана применимость методов поиска дефектов для диагностирования линейных непрерывных систем. Рассмотренный алгоритм позволяет использовать различные входные сигналы, подаваемые одновременно на объект, модель объекта и модель чувствительности. Введено понятие нормированного диагностического признака, являющегося безразмерной величиной, что позволяет производить сравнительный анализ условий и результатов диагностирования различных объектов. Предложены количественные характеристики различимости пары топологических дефектов при диагностировании с использованием функции топологической чувствительности. Применение нормированных характеристик различимости, принимающих значения в диапазоне $[0, 1]$, позволяет интерпретировать степень различимости дефектов в терминах полной различимости, частичной различимости или полной эквивалентности и сравнивать результаты диагностирования в различных режимах. Анализ формы и значений функций чувствительности позволяет предварительно определять степень влияния различных дефектов на временные характеристики объекта, а значит, предварительно оценивать возможность нахождения того или иного топологического дефекта.

Алгоритм диагностирования на основе функции топологической чувствительности позволяет обеспечить различимость дефектов в условиях наличия погрешностей измерения динамических характеристик. Решение задач поиска дефектов на тестовом примере подтвердило работоспособность (наличие помехоустойчивости), эффективность (наименьшие вычислительные и временные затраты) и широкие функциональные возможности предложенных алгоритмов, а также правильность выдвинутых теоретических положений. Показано, что апостериорные меры различимости пар дефектов дают оценки с достаточной для практики точностью.

Алгоритм использует модель топологической чувствительности, которая предполагает использование двух моделей, соединенных последовательно друг с другом связью, которая определяется расположением контролируемой топологической связи. Рассмотренный алгоритм позволяет избежать недостатков алгоритма введения пробных дефектов топологических связей, которые нужно предварительно задавать. Преимуществом рассмотренного подхода является переход от пробных топологических дефектов модели к топологической функции чувствительности без снижения различимости дефектов, а значит, и без падения помехоустойчивости диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалобанов С.В. Структурные методы поиска одиночных дефектов в динамических системах // Известия вузов. Приборостроение. – 2000. – № 4. – С. 7–13.
2. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
3. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy – a survey and some new results // Automatica. – 1990. – Vol. 26, N 3. – P. 459–474.
4. Patton R. Robust model-based fault diagnosis: the state of the art // IFAC Proceedings. – 1994. – Vol. 27 (5). – P. 1–24.

5. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом топологических связей // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 4 (23). – С. 75–82.
6. Патент 2439647 Российская Федерация. Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов. – № 2011100409/08; заявл. 11.01.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
7. *Shalobanov S.V., Shalobanov S. S.* The search defects algorithm in continuous dynamical systems by vectors of topological relations // Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). – Vladivostok, 2018. – P. 1–4.
8. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием смены позиции входного сигнала // Информатика и системы управления. – 2016. – № 2 (48). – С. 91–96.
9. Патент 2528135 Российская Федерация. Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе на основе смены позиции входного сигнала / С.С. Шалобанов. – № 2013144231/08; заявл. 01.10.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.
10. *Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* Defect search using the input signal position change and the binary diagnostic sign // 2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proceedings. – Omsk, 2018. – P. 1–4.
11. Воронин В.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом пробных отклонений параметров модели // Информатика и системы управления. – 2010. – № 1 (23). – С. 121–127.
12. Патент 2435189 Российская Федерация. Способ поиска неисправного блока в динамической системе / С.В. Шалобанов, С.С. Шалобанов. – № 2009123999/08; заявл. 23.06.2009; опубл. 21.11.2011, Бюл. № 33.
13. *Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* Defect search in automatical control systems based on trial deviations of model parameters // 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Moscow, 2017. – P. 1–4.
14. Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом логических функций // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2012. – № 3 (26). – С. 85–90.
15. Патент 2461861 Российская Федерация. Способ поиска неисправного блока в непрерывной динамической системе / С.С. Шалобанов. – № 2011140376/08; заявл. 04.10.2011; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.
16. *Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* Defect search in automatical control systems with depth to dynamic block // Proceedings 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Moscow, 2018. – P. 1–5.
17. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Алгоритм поиска дефектов в системах автоматического управления с использованием смены позиции входного сигнала // Информатика и системы управления. – 2017. – № 2 (52). – С. 57–63.
18. Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование систем автоматического управления с использованием пробных отклонений параметров модели и бинарных диагностических признаков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2017. – № 4 (47). – С. 17–22.
19. *Bloshchinskiy V.D., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S.* Application of configurable diagnostic models on IIR-filters and Laguerre filters for finding parametric defects in continuous dynamic objects // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk, 2019. – P. 1–5.
20. Воронин В.В. Информационное обеспечение процессов диагностирования в системах технического обслуживания // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2018. – № 2 (49). – С. 35–44.
21. Воронин В.В. Относительная эквивалентность дефектов // Информатика и системы управления. – 2018. – № 4 (58). – С. 60–69.
22. *Voronin V.V., Davydov O.A.* Local area network failures types, consequences and criticality analysis // Proceedings of the 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). – Vladivostok, 2017. – P. 184–187.

Воронин Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – техническая диагностика. Имеет более 140 публикаций, в том числе 4 монографии, 3 учебных пособия. E-mail: 004183vvv@mail.ru.

Шалобанов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – техническая диагностика. Имеет более 170 публикаций, в том числе 4 монографии, 5 учебных пособий. E-mail: shalobanov@mail.ru .

Шалобанов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – техническая диагностика. Имеет более 60 публикаций, в том числе одну монографию, 3 учебных пособий. E-mail: shalobanov_ne@mail.ru.

Voronin Vladimir Victorovich, D.Sc. (Eng.), professor at the department of automation and systems engineering, Pacific Sate University. His research interests are currently focused on technical diagnostics. He is the author of more than 140 publications including 4 monographs and 3 teaching manuals. E-mail: 004183vvv@mail.ru

Shalobanov Sergei Victorovich D.Sc. (Eng.), professor at the department of automation and systems engineering, Pacific Sate University. His research interests are currently focused on technical diagnostics. He is the author of more than 170 publications including 4 monographs and 5 teaching manuals. E-mail: shalobanov@mail.ru

Shalobanov Sergei Sergeevich, PhD (Eng.), an associate professor at the department of automation and systems engineering, Pacific Sate University. His research interests are currently focused on technical diagnostics. He is the author of more than 60 publications including 1 monograph and 5 teaching manuals. E-mail: shalobanov_ne@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-17-30

Diagnosis of continions dynamic sistems with the use of topological sensitivity functions*

V.V. VORONIN^a, S.V. SHALOBANOV^b, S.S. SHALOBANOV^c

Pacific State University, 136 Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk, 680035, Russian Federation

^a 004183vvv@mail.ru ^b shalobanov@mail.ru ^c shalobanov_ne@mail.ru

Abstract

The paper considers an algorithm for searching for defects in topological connections between dynamic blocks, which allows one to more fully take into account the specifics of the manifestation of a real defect: breaking one connection between the dynamic blocks of the transfer function of the diagnostic object. The use of well-known algorithms of this kind is complicated by the need to use models with trial deviations of the parameters, or the need to analyze the signs of the output signals, or to change the position of the input signal. The disadvantage of the algorithm based on trial changes in the topological relationships of the model is that it uses setting of these changes in models with trial deviations, which is a time-consuming task. The disadvantage of the algorithm with the analysis of signs of output signal transmission using a normalized diagnostic feature, as well as using the binary diagnostic feature, is that additional calculations of the signs of the transmission of the output signals from the dynamic blocks of the transfer function to the control points are necessary. The disadvantage of the algorithm with changing the position of the input signal is that it uses the movement of the place of the input signal injection to another position in the models controlling the topological connec-

* Received 10 September 2019.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-08-00737).

tion. Below, we consider an algorithm for searching for defects in the form of breaking links between the dynamic blocks of the transfer function based on the use of a topological sensitivity model using integrated estimates of the output signals of the diagnostic object. Topological sensitivity can be obtained using a structural matrix dynamic model. This approach simplifies the implementation of the algorithm by reducing the number of control points, which reduces hardware costs when diagnosing complex objects. The procedure for obtaining normalized diagnostic features and calculating a quantitative measure of the distinguishability of defects is determined.

Keywords: defect search, continuous feedback system, transfer function of dynamic block, topologic sensitivity function, diagnostic model, object of diagnosing, control points, signal deviations integral marks, normalized diagnostic sign, defects distinguishability

REFERENCES

1. Shalobanov S.V. Strukturnye metody poiska odinochnykh defektov v dinamicheskikh sistemakh [Structural methods defects of single faults searching in the dynamic systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*, 2000, no. 4, pp. 7–13.
2. Rozenvasser E.N., Yusupov R.M. *Chuvstvitel'nost' sistem upravleniya* [Sensitivity of automatic control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 464 p.
3. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy – a survey and some new results. *Automatica*, 1990, vol. 26, no. 3, pp. 459–474.
4. Patton R. Robast model-based fault diagnosis: the state of the art. *IFAC Proceedings*, 1994, pp. 1–24. *IFAC Proceedings*, 1994, vol. 27 (5), pp. 1–24.
5. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem metodom topologicheskikh svyazei [Diagnosis of continuous dynamic systems by the method of topological connections]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Pacific National University*, 2011, no. 4 (23), pp. 75–82.
6. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnogo bloka v nepreryvnoi dinamicheskoi sisteme* [Method to search for faulty block in continuous dynamic system]. Patent RF, no. 2439647, 2012.
7. Shalobanov S.V., Shalobanov S. S. The search defects algorithm in continuous dynamical systems by vectors of topological relations. *Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*, Vladivostok, 2018, pp. 1–4.
8. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem smeny pozitsii vkhodnogo signala [Diagnostics of continuous dynamic systems using input signal position change]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2016, no. 2 (48), pp. 91–96.
9. Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnogo bloka v nepreryvnoi dinamicheskoi sisteme na osnove smeny pozitsii vkhodnogo signala* [Method of searching for faulty unit in continuous dynamic system based on change of position of input signal]. Patent RF, no. 2528135, 2014.
10. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Defect search using the input signal position change and the binary diagnostic sign. *2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proceedings*, Omsk, 2018, pp. 1–4.
11. Voronin V.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem metodom probnykh otklonenii parametrov modeli [Diagnosis of continuous dynamic systems by trial deviations of model parameters]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2010, no. 1 (23), pp. 121–127.
12. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnogo bloka v dinamicheskoi sisteme* [Method of searching for faulty unit in dynamic system]. Patent RF, no. 2435189, 2011.
13. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Defect search in automatical control systems based on trial deviations of model parameters. *2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, Moscow, 2017, pp. 1–4.
14. Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem metodom logicheskikh funktsii [Diagnosis of continuous dynamic systems by the method of logical functions]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Pacific National University*, 2012, no. 3 (26), pp. 85–90.

15. Shalobanov S.S. *Sposob poiska neispravnogo bloka v nepreryvnoi dinamicheskoi sisteme* [Method of searching for faulty module in continuous dynamic system]. Patent RF, no. 2461861, 2012.
16. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Defect search in automatical control systems with depth to dynamic block. *Proceedings 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Moscow, 2018, pp. 1–5.
17. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Algoritm poiska defektov v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya s ispol'zovaniem smeny pozitsii vkhodnogo signala [Algorithm for finding defects in automatic control systems using a change in the position of the input signal]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2017, no. 2 (52), pp. 57–63.
18. Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie sistem avtomaticheskogo upravleniya s is-pol'zovaniem probnykh otklonenii parametrov modeli i binarnykh diagnosticheskikh priznakov [Diagnostics of automatic control systems using trial deviations of model parameters and binary diagnostic features]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Pacific National University*, 2017, no. 4 (47), pp. 17–22.
19. Bloschinskiy V.D., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Application of configurable diagnostic models on IIR-filters and Laguerre filters for finding parametric defects in continuous dynamic objects. *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Tomsk, 2019, pp. 1–5.
20. Voronin V.V. Informatsionnoe obespechenie protsessov diagnostirovaniya v sistemakh tekhnicheskogo obsluzhivaniya [Information support of diagnostic processes in maintenance systems]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Pacific National University*, 2018, no. 2 (49), pp. 35–44.
21. Voronin V.V. Otnositel'naya ekvivalentnost' defektov [Relative defect equivalence]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2018, no. 4 (58), pp. 60–69.
22. Voronin V.V., Davydov O.A. Local area network failures types, consequences and criticality analysis. *Proceedings of the 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*, Vladivostok, 2017, pp. 184–187.

Для цитирования:

Воронин В.В., Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем с использованием топологических функций чувствительности // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 17–30. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-17-30.

For citation:

Voronin V.V., Shalobanov S.V., Shalobanov S.S. Diagnostirovanie nepreryvnykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem topologicheskikh funktsii chuvstvitel'nosti [Diagnosis of continuous dynamic systems with the use of topological sensitivity functions]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 17–30. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-17-30.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

UDC 004.94

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-31-44

Determination of the effect of injection wells on production wells in their work dynamics by using hydrodynamic modeling*

A.M. GRIF^a, M.G. PERSOVA^b, Y.G. SOLOVEYCHIK^c

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a alexgrif@inbox.ru ^b persova@ami.nstu.ru ^c soloveychik@ami.nstu.ru

We consider a method for determining a mutual influence of a group of production and injection wells using a module of hydrodynamic modeling. The obtained results of this mutual influence are widely used in practice – from maintaining the reservoir pressure to an effective optimization of water flooding. To simulate the process of multiphase mixture filtration we use the finite element method and a specific technology that allows balancing flows across cell boundaries of the finite element mesh. The balancing method is based on the selection of corrective additives that satisfy the minimum functional of the balance of volumes of the filtered mixture with regularization. The model of mutual influence of wells uses the dependence of the wellhead pressure obtained as a result of hydrodynamic modeling, as well as volumes of an injected and/or taken-off mixture (with different signs). For a producing well of interest, the wellhead pressure is approximated by a function of the volumes of the injected mixture in a group of neighboring wells. Regression coefficients are calculated by the least squares method. The article also provides results of studies that consider the application of the method on three specific tasks that, in turn, emulate the operation of production and injection wells. To evaluate the degree of influence of a nearby well on a well of interest, a significance criterion is introduced in the form of ratios of residual sums of squared deviations. The calculation results indicate that the estimated effect of the wells corresponds to the physics of the process, which confirms the correctness of the developed procedure for analyzing the interaction of injection and production wells, and also indirectly confirms the correctness of the implementation of the module for direct problems solving. The creation of the hydrodynamic model, the calculations, as well as the analysis of the mutual influence of the wells is implemented interactively in an automated software-information system.

Keywords: reservoir simulation, filtration, finite element method, balancing flows, wells interaction, regression, influence, information system

* Received 15 October 2019.

INTRODUCTION

Today improving the quality of production processes in the oil industry is challenging without the use of high-tech software that allows building a digital model of the deposit, carrying out three-dimensional modeling and making interactive analysis of the results. Software systems of this kind should be based on the use of three-dimensional mathematical models that reflect the fundamental laws of physics, in particular hydrodynamics [1, 2]. Also, a very important task is to determine the mutual influence of production and injection wells. The obtained results of mutual influence are actively used in practice, for example, for maintaining reservoir pressure, or conducting effective water flood optimization [3].

The existing specialized software systems for modeling (e.g., ECLIPSE [4], RSM [5], etc.) use the finite volume method, due to which a balanced solution is obtained (observing the law of mass balance) [6]. However, it has a number of disadvantages for modeling areas with curved boundaries. Also, most studies to determine the mutual influence of wells use methods of mathematical statistics, or some heuristic approaches. However, a formal calculation of the mixture (or oil) withdrawal values at the producing well using a group of neighboring wells is not a universal approach, even with simple model examples. Besides the use of additional data on the spatial orientation of wells and the construction of diagrams taking into account environmental parameters does not allow achieving any acceptable results [7].

1. STATEMENT OF THE PROBLEM

Since one of the main requirements for hydrodynamic modeling systems is to comply with the law of mass conservation, numerical schemes based on the finite volume method are quite common. This method is based on the balance of flows across cell boundaries of a discrete model.

At the same time the finite element method (FEM) allows us to use a much more heterogeneous object geometry which is typical to describe the reservoir and wells geometry in this class of problems. Moreover, a formal application of FEM in the Galerkin formulation does not ensure compliance with the mass conservation law [8–10]. Therefore, modifications are most commonly used for practical applications [11]. However, this approach entails an enormous computational cost due to the use of very detailed spatial meshes to obtain solution convergence.

In this paper we will describe an approach to the use of the finite element method, which guarantees the implementation of conservation laws and does not impose additional requirements on the spatial mesh fineness. Also, a description will be given of a method based on this approach to determine the influence of injection wells on production wells using data on the injection volume, production volume and pressure on production wells.

2. FINITE ELEMENT APPROXIMATION

The process of a multiphase flow of an incompressible fluid in the isothermal area Ω can be described by a system of differential equations [12]

$$-\operatorname{div}(\rho^m \vec{u}^m) = \frac{\partial}{\partial t}(\Phi \rho^m S^m) + \tilde{f}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (1)$$

$$\bar{u}^m = -\mathbf{K} \frac{\kappa^m}{\eta^m} \text{grad}(P + P_c^m), \quad m = \overline{1, M}, \quad (2)$$

where \bar{u}^m is a filtration velocity of the m phase in porous media (Darcy's law); S^m is the saturation of the m phase; η^m is dynamic viscosity; κ^m is relative permeability; ρ^m is phase density; P is pressure; P_c^m is the capillary pressure phase; \tilde{f} is the production or injection of the phase in the field; Φ is the structure of porous rocks, and \mathbf{K} is structural permeability rocks.

With constant values of Φ , \mathbf{K} and ρ^m equations (1) – (2) can be converted into the problem [13]

$$-\text{div} \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{K} \frac{\kappa^m}{\eta^m} \text{grad}(P + P_c^m) \right) = 0, \quad (3)$$

with boundary conditions

$$P|_{\Gamma_1} = P_g, \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M \mathbf{K} \frac{\kappa^m}{\eta^m} \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = \theta, \quad (5)$$

where Γ_1 is far lateral boundaries of the domain Ω ; Γ_2 is an impermeable boundary with $\theta = 0$ and the boundaries of the wells through which the production or injection of the mixture is specified.

Problems (3) – (5) will be solved using the finite element method to discretize this Ω area to Ω_e cells. In each cell the rock and mixture parameters are constant. The pressure function P can be represented as the decomposition of linear basis functions ψ_j :

$$P = \sum_j p_j \psi_j. \quad (6)$$

The weight decomposition p_j can be found by solving sparse linear tems [14]

$$\mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{b},$$

where \mathbf{p} is a vector of unknown weights while components of the matrix \mathbf{A} and the vector \mathbf{b} of the right side are defined by the relations

$$A_{ij} = \int_{\Omega} \left(\mathbf{K} \sum_{m=1}^M \frac{\kappa^m}{\eta^m} \text{grad} \psi_j \right) \text{grad} \psi_i d\Omega,$$

$$b_i = \int_{\Gamma_2} \theta \psi_i d\Omega - \int_{\Omega} \left(\mathbf{K} \sum_{m=1}^M \frac{\kappa^m}{\eta^m} \text{grad} P_c^m \right) \text{grad} \psi_i d\Omega.$$

We make an approximation of the fluid flow across boundaries Γ_i of the cell area Ω_e . For this we calculate the filtration velocity

$$\bar{u}_{\Gamma_i} = -\mathbf{K} \sum_{m=1}^M \frac{\kappa^m}{\eta^m} \text{grad} \left(\sum_j p_j \psi_j + P_c^m \right),$$

according to which the volumes of the filtered mixture can be calculated on the face Γ_i of the finite element Ω_e :

$$Q_{\Gamma_i} = \int_{\Gamma_i} \bar{u}_{\Gamma_i} \cdot \bar{n}_{\Gamma_i} d\Gamma, \quad (7)$$

where \bar{n}_{Γ_i} is a normal vector to the face Γ_i . The flow direction is defined by the value $Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e}$, which is equal to 1 if Q_{Γ_i} flows into the element Ω_e and is equal to -1 if Q_{Γ_i} flows out.

The flowing volume can be different on both sides of the face, and the flowing volume may not be equal to the flowing volume, due to an error in the numerical solution. Therefore, we will use the balancing process flows for the averaged volume on the face \hat{Q}_{Γ_i} .

Let us find such corrective additives δQ_i (where i is the global number of faces) for each finite element, that they, on the one hand, minimize the total system unbalance, and, on the other hand, are close to the calculated numerical flow. These corrective additives can be found as a result of δQ_i minimization following the functional [15]:

$$\sum_{e=1}^{N^e} \beta_e \left(\sum_{i \in I_{\Omega_e}} \left(Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot |\hat{Q}_{\Gamma_i}| + Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot \delta Q_i \right) \right)^2 + \sum_{i=1}^{N^f} \alpha_i (\delta Q_i)^2, \quad (8)$$

where e is the number of the finite element; I_{Ω_e} is a set of faces Γ_i of the finite element Ω_e ; N^e and N^f are numbers of finite elements and faces; β_e and α_i are parameters. The parameter values β_e should be chosen as small as possible but still they should ensure the required imbalance δQ^{crit} :

$$\sum_{e=1}^{N^e} \beta_e \left| \sum_{i \in I_{\Omega_e}} \left(Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot |\hat{Q}_{\Gamma_i}| + Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot \delta Q_i \right) \right| < \delta Q^{crit}.$$

As a result of minimizing the functional (8) to δQ_i we get a system of linear equations

$$(\mathbf{B} + \boldsymbol{\alpha})\mathbf{q} = \mathbf{d}, \quad (9)$$

where \mathbf{q} is a vector of unknown values δQ_i , $\boldsymbol{\alpha}$ is a matrix with elements α_i , and components of the matrix \mathbf{B} and vector \mathbf{d} can be found by using the relations

$$B_{ij} = \begin{cases} 2, & i = j, \\ \beta_e \cdot Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot Sg_{\Gamma_j}^{\Omega_e}, & i, j \in I_{\Omega_e}, i \neq j, e = 1 \dots N^e, \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$d_i = - \sum_{e=1}^{N^e} Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot \sum_{j \in I_{\Omega_e}} \hat{Q}_{\Gamma_j, \Omega_e}.$$

Rows/columns corresponding to the boundary conditions (5) on the faces of the mixture volume should be deleted from the system (9).

The balanced volume mixtures $\tilde{Q}_{\Gamma_i, \Omega_e}$ are defined as

$$\tilde{Q}_{\Gamma_i, \Omega_e} = Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot |\hat{Q}_{\Gamma_i, \Omega_e}| + Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot \delta Q_{i, \Omega_e}.$$

Using the volumes of the mixture $\tilde{Q}_{\Gamma_i, \Omega_e}$ we can calculate the saturation distribution at the current time step. We denote by

$$\tilde{Q}_{\Gamma_i, \Omega_e}^m = \tilde{Q}_{\Gamma_i, \Omega_e} \frac{\kappa^m}{\eta^m \sum_{n=1}^M \kappa^n / \eta^n}$$

an instantaneous (per unit time) volume of the m phase overflowing through the face Γ_i . Then during the time Δt the volume of the m -th phase equal to

$$V_{\Gamma_i, \Omega_e}^m = |\tilde{Q}_{\Gamma_i, \Omega_e}^m| \cdot \Delta t.$$

will overflow through the face Γ_i .

At the beginning of the time step, the volume of the m phase in the cell Ω_e is

$$\bar{V}_{\Omega_e}^m = \Phi \bar{S}^m \text{mes}(\Omega_e),$$

where \bar{S}^m is the saturation of the m phase at the beginning of the time step, and $\text{mes}(\Omega_e)$ is the volume Ω_e .

Now we can determine the m phase saturation at the end of the current time:

$$S^m = \frac{\sum_{i \in I_{in, \Omega_e}} V_{\Gamma_i, \Omega_e}^m - \sum_{j \in I_{out, \Omega_e}} V_{\Gamma_j, \Omega_e}^m + \bar{V}_{\Omega_e}^m}{\Phi \cdot \text{mes}(\Omega_e)},$$

where I_{in, Ω_e} is a set of face numbers through which the mixture flows into Ω_e , and I_{out, Ω_e} is a set of face numbers through which the mixture flows out from Ω_e .

We will repeat the described process on each time layer.

3. DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF WELLS

To determine an influence of injection wells on production wells it is proposed to use data on an average daily injection volume changing in time in injection wells, the production volume and pressure of producing wells.

According to the obtained solution (6) pressure on injection wells can be calculated as

$$P_k = \frac{\sum_{j \in I_{W_k}} \int_{\Gamma_j} P_{\Gamma_j} d\Gamma}{\sum_{j \in I_{W_k}} \int_{\Gamma_j} d\Gamma}, \quad (10)$$

where I_{W_k} is a set of face numbers Γ_i of the k injection well.

The pressure value (10) on the production well W_k at the time t_i can be approximated by the function \tilde{P}_k of the volume Q_j of the injected mixture on a group of neighboring wells:

$$\tilde{P}_k(t_i) = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j Q_j(t_i). \quad (11)$$

The normalized residual sum of squares of deviations (RSS) can be considered as a criterion of the proximity of the dependence \tilde{P}_k to the function P_k . In this case, the coefficients a_0, a_1, \dots, a_m are found by the least squares method.

To assess the degree of influence of the j -th well let us introduce the value significance test (hereinafter – an influence coefficient) in the following form

$$\chi_j = (RSS_j - RSS) / RSS, \quad (12)$$

where the RSS_j value is obtained by finding the \tilde{P}_y function coefficients excluded from the j -th well.

The influence coefficient χ_j will be maximum for injection wells that have the greatest impact on the production well of interest.

4. SOFTWARE – INFORMATION SYSTEM

For convenient creation of a hydrodynamic model of the field, as well as for viewing the obtained calculation results, a software-information system was developed. Fig. 1 shows a graphical interface of this system.

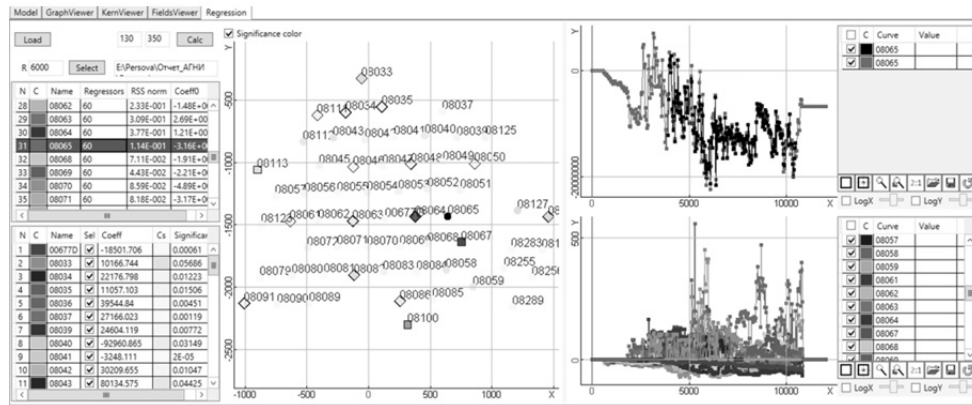


Fig. 1. Window view of the information system for determining the wells interference

Рис. 1. Вид информационной системы для определения взаимовлияния скважин

The system consists of three logical units. Elements of the input parameters for the analysis model, lists of production and injection wells with the characteristics of influence and control buttons are located in the left part of the GUI window. A graphical display of the wells in the plan (Oxy planes) in various color gradations is given in the center. A unit for displaying of characteristics of wells mutual influence is shown on the right. A circle is used to display wells in the center; a square is used to display injection wells, and a rhombus is used to display production wells which were converted into injection wells.

The list of analyzed production wells is presented in a table and contains the following information: the serial number of the well (column N), the color of the well display (C), the identifier of the well (Name), the number of selected regressors or affecting wells (Regressors), a normalized residual sum of squares (RSS norm), and a free term (Coeff0).

When you click on the production well of interest, the list of influencing injection / produc wells is updated, which is also presented in the form of a table containing the following information: the serial number of the well (column N), the color of the well display (C), the identifier (name) of the well (Name), the mark of selecting this well in the analyzed model (Sel) (the system provides an ability to include/exclude individual wells from the analysis, and also to use for analysis only a group of wells located inside a circle with a radius (R), a linear regression coefficient for the given well (Coeff), the color of the well display by the degree of its influence on the studied production well (C), the influence coefficient reflecting the degree of influence of the current well on the analyzed production well (Significance).

The information system provides an ability to determine an influence of wells on the time interval of interest. To do this, you need to set two boundaries of the interval. At the top of the right block, the graphs of the initial pressure and the pressure on the production well in the selected time interval found by the proposed method are displayed (shown in black). At the bottom of the right block are graphs of injections and productions from all wells used in the analysis. They can be viewed separately (turning on/off the corresponding graph), and it is possible to change the scale.

5. COMPUTATIONAL EXPERIMENTS

Testing of the developed module was carried out on synthetic data obtained using the module for solving direct problems.

Let us consider a three-layer model in which the first and third permeable layers are separated by impermeable interlayers (the model task was carried out using an automated system [16]). In this case, we consider three versions of this model. In the first case (model 1) a dividing interlayer is completely impermeable, but homogeneous permeability is set in the top and bottom layers (oil saturation distribution and location of wells are shown in Fig. 2, *a, b*) (oil saturation distribution and location of wells are shown in Fig. 2, *a, b*). In the second case (model 2) an impermeable “partition” is set in the upper layer (see. Fig. 2, *c*), while in the third case 3 (model 3) a permeable zone is set in the impermeable interlayer which separates the upper and lower layers (see. Fig. 2, *d*).

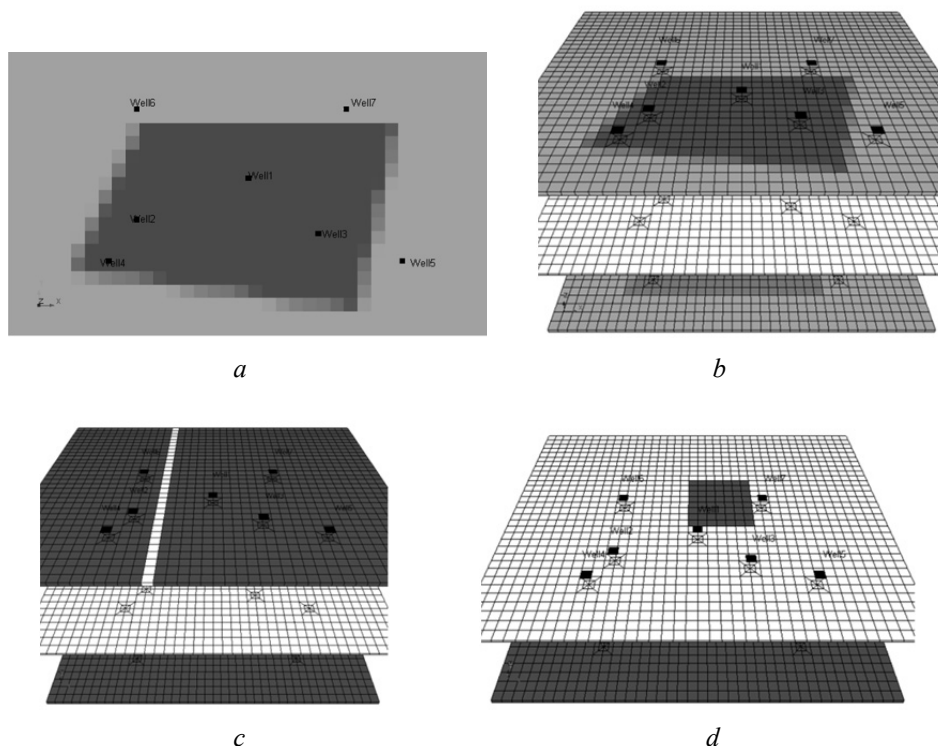


Fig. 2. Models to test procedures for determining the mutual influence of injection and production wells:

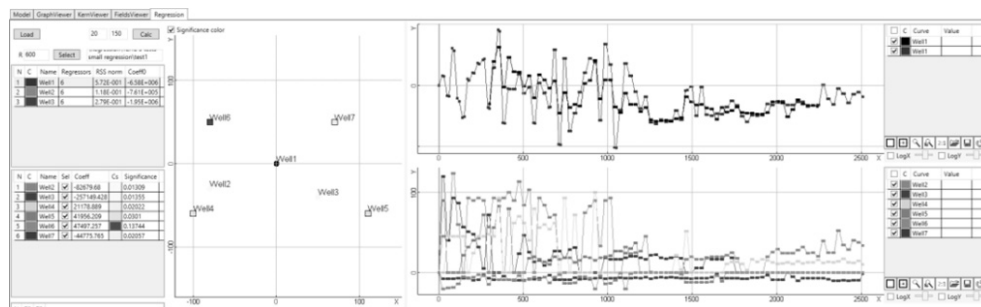
a – the distribution of saturation in the upper layer and the location of the wells; *b* – a layered view saturation in model 1; *c* – a layered view of permeability in model 2; *d* – a layered view of permeability in model 3 (with a removed upper layer)

Рис. 2. Модели для тестирования процедуры определения взаимовлияния нагнетательных и добывающих скважин:

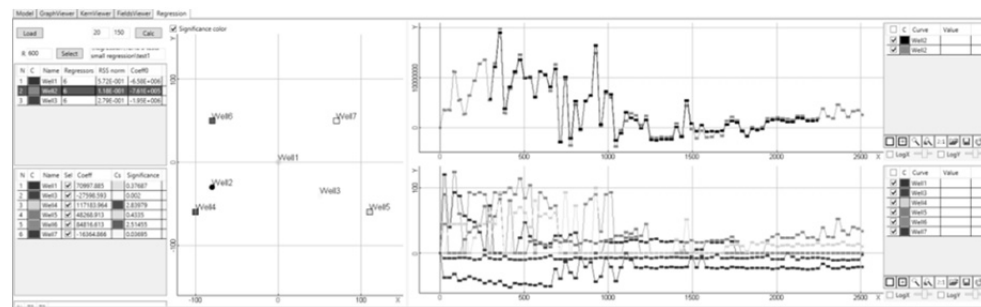
a – распределение насыщенности в верхнем слое и расположение скважин; *б* – послойный вид насыщенности в модели 1; *в* – послойный вид проницаемости в модели 2; *г* – послойный вид проницаемости в модели 3 (со снятым верхним слоем)

Thus, Well 1 takes off only from the upper layer, Well 2 takes off from both the top and the bottom layers, and Well 3 takes off only from the bottom layer. In turn, Well 4, Well 5 and Well 6 inject into the upper layer and Well 7 injects into the lower layer.

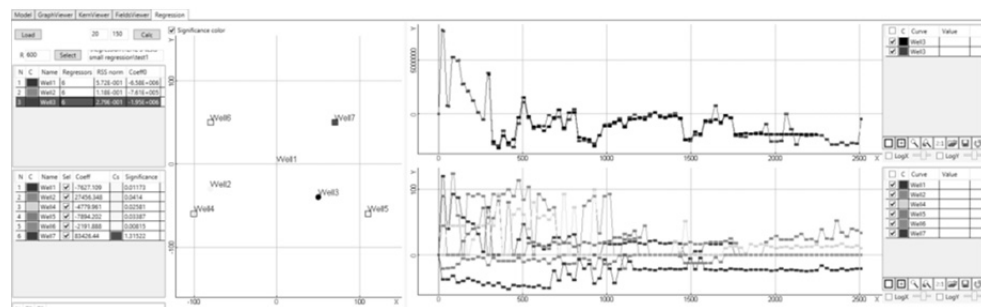
Fig. 3 presents the results of procedures to determine the influence of wells for Model 1. It can be seen that Well 1 is mainly influenced by Well 6 (as Well 7 injects into the layer separated by an impermeable interlayer and Well 4 and Well 5 are separated by production wells, namely Well 2 and Well 3). Well 2 is affected by Well 6 and Well 4 (with an influence coefficient of 2.5-2.8), and Well 3 is affected by Well 7 (which, despite the fact that it is further located, injects in the same layer from which production Well 3 takes off, and this layer is separated by impermeable interlayers).



a



b



c

Fig. 3. The influence of Well 1 (a), Well 2 (b) and Well 3 (c) according to the synthesized model 1

Рис. 3. Влияние на скважины Well 1 (а), Well 2 (б) и Well 3 (в) по данным, синтезированным для модели 1

Fig. 4, *a, b* shows the results for model 2. It can be seen that the influence on Well 1 dropped sharply since it became a separate impermeable "barrier", and the influence on Well 2, on the contrary, increased dramatically (the influence coefficient became 3.5). Fig. 4, *c* presents the results of model 3. It can be seen that due to the appearance of permeable zones in the interlayer Well 3 became affected by Well 5 which injects into the upper layer in addition to Well 7.

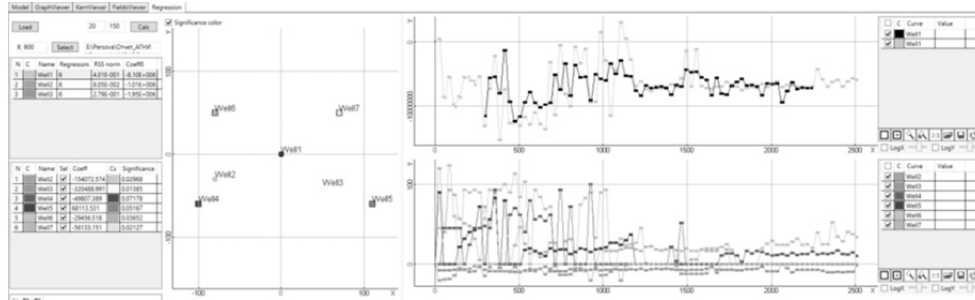
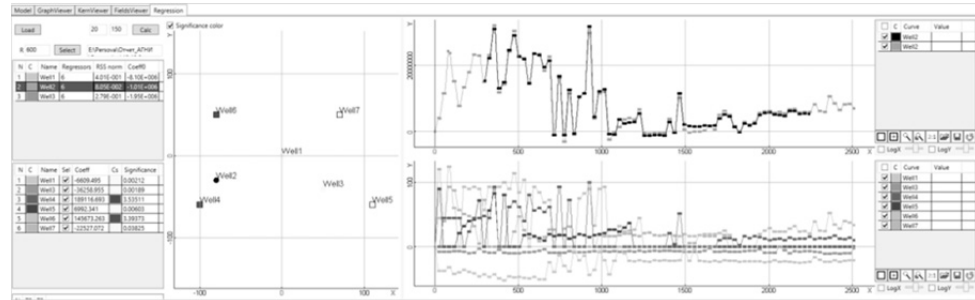
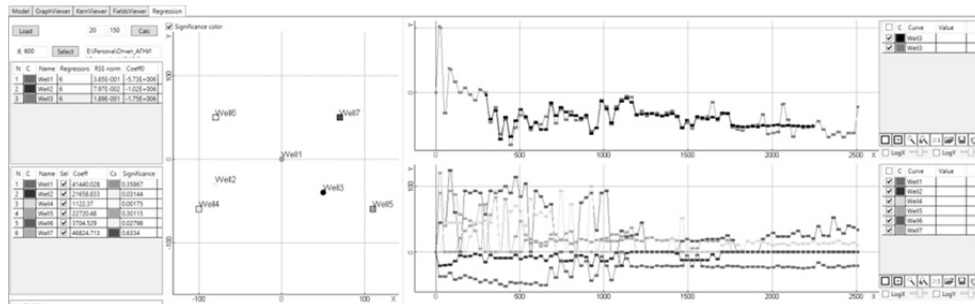
*a**b**c*

Fig. 4. The influence of Well 1 (*a*) and Well 2 (*b*) according to the synthesized model 2, and Well 3 (*c*) according to the synthesized model 3

Рис. 4. Влияние на скважины Well 1 (*a*) и Well 2 (*b*) по данным, синтезированным для модели 2, и на скважину Well 3 (*c*) по данным, синтезированным для модели 3

CONCLUSION

The method for determining the influence of injection wells on production wells is presented in the paper. The aforementioned method of finite-element modeling of hydrodynamic processes avoids the disadvantages of the classical Galerkin

method and guarantees the observance of the law of mass balance of the filtered components of the mixture. The conducted study of characteristic synthetic models allows us to conclude that the estimated influence of wells corresponds to the physics of the process. This confirms the correctness of the developed procedure for analyzing the interaction of injection and production wells, and also indirectly confirms the correctness of the implementation of the module for solving direct problems. Creating a hydrodynamic model, carrying out calculations, as well as analyzing mutual influence of wells, are implemented in an automated software-information system.

REFERENCES

1. Clemens T., Kienberger G., Persaud M., Suri A., Sharma M.M., Boschi M., Øverland A.M. Optimizing water-injection design in a shallow offshore reservoir. *SPE Production and Operations*, 2017, vol. 32, no. 4, pp. 551–563.
2. Bautista J.F., Taleghani A.D. Prediction of formation damage at water injection wells due to channelization in unconsolidated formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 64, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.073.
3. Vasil'ev V.V. Ispol'zovanie rezul'tatov otsenki vzaimovliyaniya dobyvayushchikh i nagnetatel'nykh skvazhin dlya optimizatsii zavodneniya [Use of results of an estimation of producing and injection wells interference for the waterflooding optimization]. *Neftyanoe khozyaistvo – Oil Industry*, 2009, no. 6, pp. 30–32. (In Russian).
4. Mosleh M.H., Govindan R., Shi J., Durucan S., Korre A. The use of polymer-gel remediation for CO₂ leakage through faults and fractures in the caprock. *Energy Procedia*, 2017, vol. 114, pp. 4164–4171. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1557.
5. Nekrasov A.S., Potekhin D.V., Shilov A.V., Prisyazhnyuk M.A. Obosnovanie polozheniya vodoneftyanogo kontakta pri geologo-gidrodinamicheskom modelirovanii zalezhei nefti i gaza [Substantiation of oil-water contact location for the purposes of its geological and hydro-dynamic modeling]. *Geomodel 2016 – 18th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*, Gelendzhik, 2016, pp. 156–161. DOI: 10.3997/2214-4609.201602239. (In Russian).
6. Cao H., Crumpton P.I., Schrader M.L. Efficient general formulation approach for modeling complex physics. *SPE Reservoir Simulation Symposium 2009*, The Woodlands, TX, 2009, vol. 2, pp. 1075–1086. DOI: 10.2118/119165-MS.
7. Stepanov S.V., Sokolov S.V., Ruchkin A.A., Stepanov A.V., Knyazev A.V., Korytov A.V. Problematika otsenki vzaimovliyaniya dobyvayushchikh i nagnetatel'nykh skvazhin na osnove matematicheskogo modelirovaniya [Considerations on mathematical modeling of producer-injector interference]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika – Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 146–164. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-146-164.
8. Zhang R.H., Zhang L.H., Luo J.X., Yang Z.D., Xu M.Y. Numerical simulation of water flooding in natural fractured reservoirs based on control volume finite element method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 146, pp. 1211–1225. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.08.024.
9. Nick H.M., Matthäi S.K. A hybrid finite-element finite-volume method with embedded discontinuities for solute transport in heterogeneous media. *Vadose Zone Journal*, 2011, vol. 10, no. 1, pp. 299–312. DOI: 10.2136/vzj2010.0015.
10. Nick H.M., Matthäi S.K. Comparison of three FE-FV numerical schemes for single- and two-phase flow simulation of fractured porous media. *Transport in Porous Media*, 2011, vol. 90, no. 2, pp. 421–444. DOI: 10.1007/s11242-011-9793-y.
11. Abushaikh A.S., Blunt M.J., Gosselin O.R., Pain C.C., Jackson M.D. Interface control volume finite element method for modelling multi-phase fluid flow in highly heterogeneous and fractured reservoirs. *Journal of Computational Physics*, 2015, vol. 298, pp. 41–61. DOI: 10.1016/j.jcp.2015.05.024.
12. Aziz K., Settari A. *Petroleum reservoir simulation*. London, Applied Science Publishers, 1979 (Russ. ed.: Aziz Kh., Settari E. *Matematicheskoe modelirovanie plastovykh system*. Moscow, Nedra Publ., 1982. 407 p.).

13. Patrushev I.I., Persova M.G., Soloveychik Yu.G. [Research of the numerical method of modeling of three-dimensional multiphase flow]. *Obrabotka informatsii i matematicheskoe modelirovaniye: materialy Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proceedings of Russian scientific conference "Information Processing and Mathematical Modelling"], Novosibirsk, 26–27 April, 2018, pp. 85–92. (In Russian).

14. Soloveychik Yu.G., Royak M.E., Persova M.G. *Metod konechnykh elementov dlya skalyarnykh i vektornykh zadach* [The finite element method for the solution of scalar and vector problems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007. 896 p.

15. Persova M.G., Soloveichik Yu.G., Grif A.M., Patrushev I.I. Flow balancing in FEM modeling of multi-phase flow in porous media. *2018 14th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE)-44894 proceedings*, Novosibirsk, October 2–6, 2018, vol. 1, pt. 4, pp. 205–211.

16. Grif A.M., Persova M.G. Postroenie poverkhnostei sloev geologicheskoi modeli neftyanogo mestorozhdeniya dlya modelirovaniya protsessa mnogofaznoi fil'tratsii [Construction of the layer surfaces of a geological model of an oil field for modeling the multiphase filtration process]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovation], Novosibirsk, December 3–7, 2018. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018, pt. 2, pp. 121–125.

Alexander M. Grif, a graduate student at the Department of Applied Mathematics, Faculty of Applied Mathematics and Computer Science, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on finite-element modeling of physical processes. He has published 17 scientific papers. Email: alexgrif@inbox.ru

Marina G. Persova, a professor at the Department of Applied Mathematics, Faculty of Applied Mathematics and Computer Science, Novosibirsk State Technical University. Her research interests include finite element modeling and solution of inverse problems of mathematical physics. She has published more than 150 scientific papers and educational manuals. Email: persova@ami.nstu.ru

Yuri G. Soloveichik, head of the Department of Applied Mathematics, Faculty of Applied Mathematics and Computer Science, Novosibirsk State Technical University. His research interests cover finite element modeling and solution of inverse problems of mathematical physics. He is the author of more than 150 scientific and educational publications. Email: soloveychik@ami.nstu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-31-44

Определение влияния нагнетательных скважин на добывающие в динамике их работы с использованием гидродинамического моделирования*

A.M. ГРИФ^a, M.G. ПЕРСОВА^b, Ю.Г. СОЛОВЕЙЧИК^c

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

^a alexgrif@inbox.ru ^b persova@ami.nstu.ru ^c soloveychik@ami.nstu.ru

Рассматривается способ для определения взаимовлияния группы добывающих и нагнетательных скважин с использованием модуля гидродинамического моделирования. Полученные результаты взаимовлияния широко используются в практике – от поддержания пластового давления до эффективной оптимизации заводнения. Для моделирования процесса фильтрации многофазной смеси используются метод конечных элементов и специальная технология балансировки потоков через границы ячеек конечноэлементной сетки. Метод балансировки основан на подборе корректирующих добавок, удовлетворя-

* Статья получена 15 октября 2019 года.

ющих минимуму функционала баланса объемов фильтрующейся смеси с регуляризацией. В модели взаимовлияния скважин используются полученная в результате гидродинамического моделирования зависимость устьевого давления, а также объемы закачиваемой и/или отбираемой смеси (с разными знаками). Для интересующей добывающей скважины устьевое давление аппроксимируется функцией от объемов закачиваемой смеси на группе соседних скважин. Коэффициенты регрессии находятся с помощью метода наименьших квадратов. Приведены исследования применения метода на трех характерных задачах, эмулирующих работу добывающих и нагнетательных скважин. Для оценки степени влияния соседней скважины на интересующую скважину вводится критерий значимости (коэффициент влияния) в виде отношений остаточных сумм квадратов отклонений. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что оцененное влияние скважин соответствует физике процесса – это подтверждает корректность работы разработанной процедуры анализа взаимовлияния нагнетательных и добывающих скважин, а также косвенно подтверждает правильность реализации модуля решения прямых задач. Задание гидродинамической модели, проведение расчетов, а также анализ взаимовлияния скважин реализованы в интерактивном режиме в автоматизированной программно-информационной системе.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, фильтрация, метод конечных элементов, балансировка потоков, взаимодействие скважин, регрессия, влияние, информационная система

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optimizing water-injection design in a shallow offshore reservoir / T. Clemens, G. Kienberger, M. Persaud, A. Suri, M.M. Sharma, M. Boschi, A.M. Øverland // SPE Production and Operations. – 2017. – Vol. 32, N 4. – P. 551–563.
2. *Bautista J.F., Taleghani A.D.* Prediction of formation damage at water injection wells due to channelization in unconsolidated formations // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 64. – P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.073.
3. *Васильев В.В.* Использование результатов оценки взаимовлияния добывающих и нагнетательных скважин для оптимизации заводнения // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 6. – С. 30–32.
4. The use of polymer-gel remediation for CO₂ leakage through faults and fractures in the caprock / M.H. Mosleh, R. Govindan, J. Shi, S. Durucan, A. Korre // Energy Procedia. – 2017 – Vol. 114. – P. 4164–4171. – DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1557.
5. Обоснование положения водонефтяного контакта при геолого-гидродинамическом моделировании залежей нефти и газа / А.С. Некрасов, Д.В. Потехин, А.В. Шилов, М.А. Присяжнюк // Geomodel 2016 – 18th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development. – Gelendzhik, 2016. – P. 156–161. – DOI: 10.3997/2214-4609.201602239.
6. *Cao H., Crumpton P.I., Schrader M.L.* Efficient general formulation approach for modeling complex physics // SPE Reservoir Simulation Symposium 2009. – The Woodlands, TX, 2009. – Vol. 2. – P. 1075–1086. – DOI: 10.2118/119165-MS.
7. Проблематика оценки взаимовлияния добывающих и нагнетательных скважин на основе математического моделирования / С.В. Степанов, С.В. Соколов, А.А. Ручкин, А.В. Степанов, А.В. Князев, А.В. Корытов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2018. – Т. 4. № 3. – С. 146–164. – DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-146-164.
8. Numerical simulation of water flooding in natural fractured reservoirs based on control volume finite element method / R.H. Zhang, L.H. Zhang, J.X. Luo, Z.D. Yang, M.Y. Xu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – Vol. 146. – P. 1211–1225. – DOI: 10.1016/j.petrol.2016.08.024.
9. *Nick H.M., Matthäi S.K.* A hybrid finite-element finite-volume method with embedded discontinuities for solute transport in heterogeneous media // Vadose Zone Journal. – 2011. – Vol. 10, N 1. – P. 299–312. – DOI: 10.2136/vzj2010.0015.

10. Nick H.M., Matthäi S.K. Comparison of three FE-FV numerical schemes for single- and two-phase flow simulation of fractured porous media // *Transport in Porous Media*. – 2011. – Vol. 90, N 2. – P. 421–444. – DOI: 10.1007/s11242-011-9793-y.
11. Interface control volume finite element method for modelling multi-phase fluid flow in highly heterogeneous and fractured reservoirs / A.S. Abushaikha, M.J. Blunt, O.R. Gosselin, C.C. Pain, M.D. Jackson // *Journal of Computational Physics*. – 2015. – Vol. 298. – P. 41–61. – DOI: 10.1016/j.jcp.2015.05.024.
12. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем: пер. с англ. – М.: Недра, 1982. – 407 с.
13. Патрушев И.И., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. Исследование численного метода трехмерного моделирования процесса многофазной фильтрации // *Обработка информации и математическое моделирование: материалы Российской научно-технической конференции (Новосибирск, 26–27 апр. 2018 г.)*. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2018. – С. 85–92.
14. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для скалярных и векторных задач. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 869 с.
15. Flow balancing in FEM modelling of multi-phase flow in porous media / M.G. Persova, Yu.G. Soloveichik, A.M. Grif, I.I. Patrushev // *Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018) = 2018 14th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE)-44894 proceedings, Новосибирск, 2–6 октября 2018 г.: в 8 т.* – Новосибирск, 2018. – Т. 1, ч. 4. – С. 205–211.
16. Гриф А.М., Персова М.Г. Построение поверхностей слоев геологической модели нефтяного месторождения для моделирования процесса многофазной фильтрации // *Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов: в 9 ч., Новосибирск, 3–7 декабря 2018 г.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 121–125.

Для цитирования:

Гриф А.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. Определение влияния нагнетательных скважин на добывающие в динамике их работы с использованием гидродинамического моделирования // *Научный вестник НГТУ*. – 2019. – № 4 (77). – С. 31–44. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-31-44. – Текст англ.

For citation:

Grif A.M., Persova M.G., Soloveychik Y.G. Determination of the effect of injection wells on production wells in their work dynamics by using hydrodynamic modeling. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 31–44. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-31-44.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 681.5.013

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-45-54

Метод формирования траектории для группы подвижных объектов с помощью кластеризации в двумерной среде*

М.Ю. МЕДВЕДЕВ^а, В.С. ЛАЗАРЕВ^б

347928, РФ, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, Южный федеральный университет

^а medvmihal@sfedu.ru ^б vlazarev@sfedu.ru

Рассматривается проблема планирования траекторий движения группы подвижных объектов, функционирующей в двумерной среде с неподвижными препятствиями, с учетом максимизации минимального расстояния между объектами в группе. Среда содержит препятствия, расположение которых заранее не известно. Актуальность этой проблемы многократно подчеркивалась в работах отечественных и зарубежных ученых. Метод основан на использовании максиминной задачи для решения уравнений, представляющих собой расстояние от каждого подвижного объекта до границы области функционирования и препятствий, а также между самими подвижными объектами в группе. Для сокращения количества решаемых уравнений расстояние рассчитывается только для соседних объектов, для чего используется кластеризация на основе триангуляции Делоне. Таким образом, система управления группой подвижных объектов имеет два уровня. На первом осуществляется решение кластеризация на основе триангуляции Делоне. На втором уровне решается максиминная задача, позволяющая расположить подвижные объекты в среде так, чтобы максимизировать минимальное расстояние между любыми объектами среды: между подвижными объектами, между подвижными объектами и препятствиями, а также между подвижными объектами и границами области функционирования. Проведено численное моделирование группы, состоящей из пяти подвижных объектов в среде с неподвижными препятствиями. Произведено сравнение результатов моделирования работы предложенного метода и метода без кластеризации. Обсуждается дальнейшее развитие предлагаемого метода планирования траекторий движения, включающее адаптацию метода под трехмерную среду.

Ключевые слова: групповое управление, подвижный объект, максиминная задача, триангуляция Делоне, планирование траектории

* Статья получена 20 сентября 2019 г.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 16-19-0001 и НИР СП-4658.2018.5 (Конкурс СП-2018) (раздел 3), выполняемых Южным федеральным университетом.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальна тематика планирования движения групп подвижных объектов в различных средах. В связи со сложностью проблем планирования и группового взаимодействия единого подхода, дающего эффективное решение в различных условиях, не существует [1].

Для решения задач группового управления в условиях неопределенности применяются мультиагентные подходы [2, 3], технологии искусственного интеллекта [4, 5], а также методы потенциальных полей и методы неустойчивых режимов.

Большинство из перечисленных методов предполагает использование картографирования, требует большого объема передаваемых данных и отличается вычислительной сложностью.

Метод потенциальных полей [6, 7] не требует мощных вычислителей и большого объема передаваемых данных, однако имеет проблему попадания в локальные минимумы. Помимо того, в данном методе не учитываются скорости подвижных объектов и препятствий, что является критичным для обхода подвижных препятствий.

Метод неустойчивых режимов [8–10] основан на применении теоремы Ляпунова о неустойчивости. Метод является родственным методу потенциальных полей и также не требует мощных вычислителей и большого объема передаваемых данных. Наличие в методе условия перехода из устойчивого режима в неустойчивый и постоянная проверка условия делает возможным оперативно реагировать на изменения среды. Таким образом, данный метод является предпочтительным для движения в неопределенной среде.

Важно отметить перспективность гибридных методов управления. Такие методы сочетают несколько простых методов воедино. Многочисленные результаты исследований указывают эффективность гибридизации алгоритмов и методов в задачах планирования и управления движением [11–14]. В работе [14] показано, что гибридизация различных методов при решении задач планирования пути приводит к увеличению интегрального критерия качества до 50 %.

В настоящей статье рассматривается проблема планирования траекторий движения группы подвижных объектов, функционирующей в двумерной среде с неподвижными препятствиями, с учетом максимизации минимального расстояния между объектами в группе. Для этой цели предлагается использовать гибридный метод планирования траектории группы подвижных объектов, отличающийся использованием кластеризации объектов, а также имеющий оптимизационную компоненту для распределения подвижных объектов в области функционирования.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется группа из n подвижных объектов, которые функционируют в двумерной среде (рис. 1).

Подвижные объекты группы (на рис. 1 обозначены O_i) должны распределиться в области, ограниченной точками B_1, B_2, B_3, B_4 . После распределения группа должна двигаться вдоль оси Y . Среда содержит препятствия Obs , расположение которых заранее не известно.

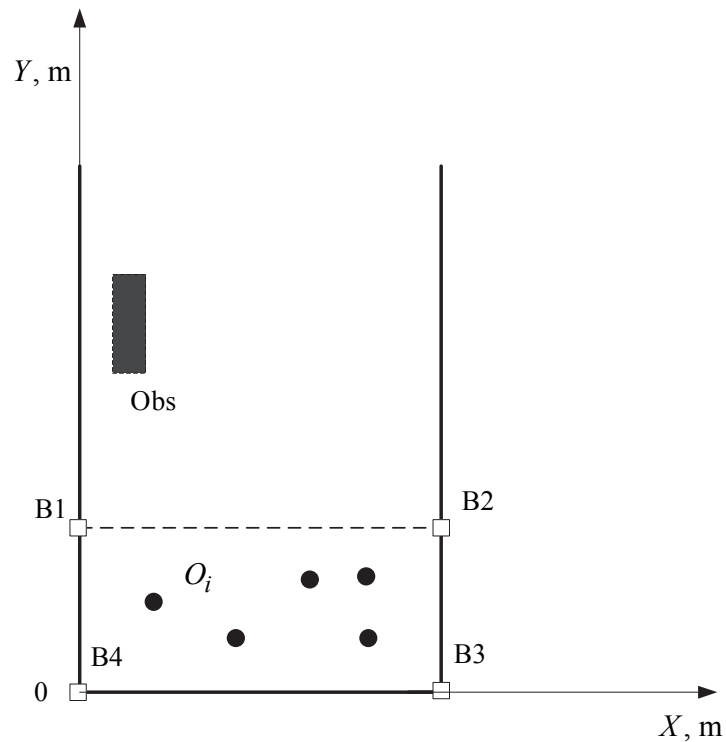


Рис. 1. Постановка задачи

Fig. 1. Problem statement

Необходимо спланировать траекторию для каждого подвижного объекта в группе так, чтобы максимизировать минимальное расстояние между любыми объектами среды, а также обеспечить обход препятствий, встречающихся на пути. Под объектами среды понимаются подвижные объекты группы O_i , границы области функционирования B1–B4, а также препятствия Obs.

2. МАКСИМИЗАЦИЯ МИНИМАЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ

Расстояние между всеми объектами среды вычисляется по формуле

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (1)$$

где r_{ij} – расстояние от i -го объекта до j -го; x и y – координаты объектов по осям X и Y (рис. 1); i – номер подвижного объекта; j – номер объекта среды.

Требуется рассчитать расстояния от i -го объекта до всех объектов среды, определить минимальное, а затем оптимизировать положение подвижных объектов таким образом, чтобы оно могло максимизировать минимальное расстояние:

$$\min r_{ij} \rightarrow \max. \quad (2).$$

В результате выполнения первого шага (1) создается матрица R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} & \dots & r_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & r_{nm} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где r_{ij} – расстояние от i -го объекта до j -го; n – число объектов в группе; m – число объектов среды. Матрица до n -го столбца имеет треугольный вид, так как расстояние от i -го объекта до j -го равно расстоянию от j -го объекта до i -го.

После заполнения матрицы R запускается оптимизационная процедура $F_{\min \max}$. В качестве ограничений выступают координаты точек В1–В4, а в качестве уравнений для оптимизации – элементы матрицы R .

3. КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ СРЕДЫ

С увеличением числа препятствий на h число элементов матрицы R (3) будет расти на величину равную $n \times h$. Для того чтобы снизить число расчетов, предлагается использовать кластеризацию подвижных объектов на основе триангуляции Делоне.

Кластеризация осуществляется следующим образом. Совокупность подвижных объектов и препятствий представляет собой обобщенную группу объектов среды (см. рис. 1).

На первом этапе осуществляется кластеризация объектов среды с помощью триангуляции Делоне. В результате триангуляции для каждого робота O_i , $i = \overline{1, n}$, получается множество объектов, с которыми i -й робот связан ребрами. На рис. 2 приведен результат кластеризации для группы из пяти подвижных объектов в среде Matlab.

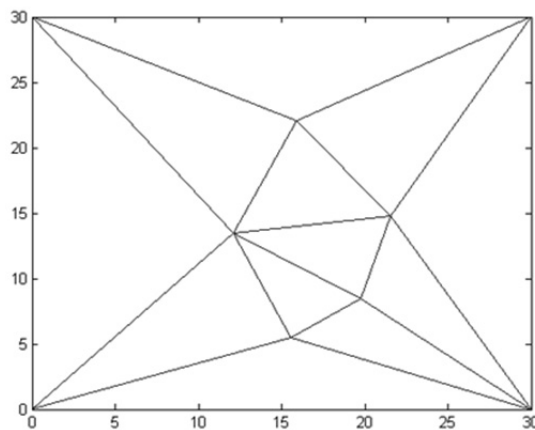


Рис. 2. Пример применения триангуляции Делоне

Fig. 2. An example of the Delaunay triangulation application

Встроенная в Matlab функция Delaunay позволяет получить матрицу триангуляции, каждая строчка в которой есть перечисление порядковых номеров объектов, образующих треугольник, число строчек соответственно равно числу треугольников.

Для дальнейшей работы для каждого подвижного объекта выделяются его соседи. Для решения этой задачи вначале строится массив связей каждого объекта, а затем из этого массива исключаются повторяющиеся элементы.

Для создания массива связей подвижных объектов группы разработан алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 3.

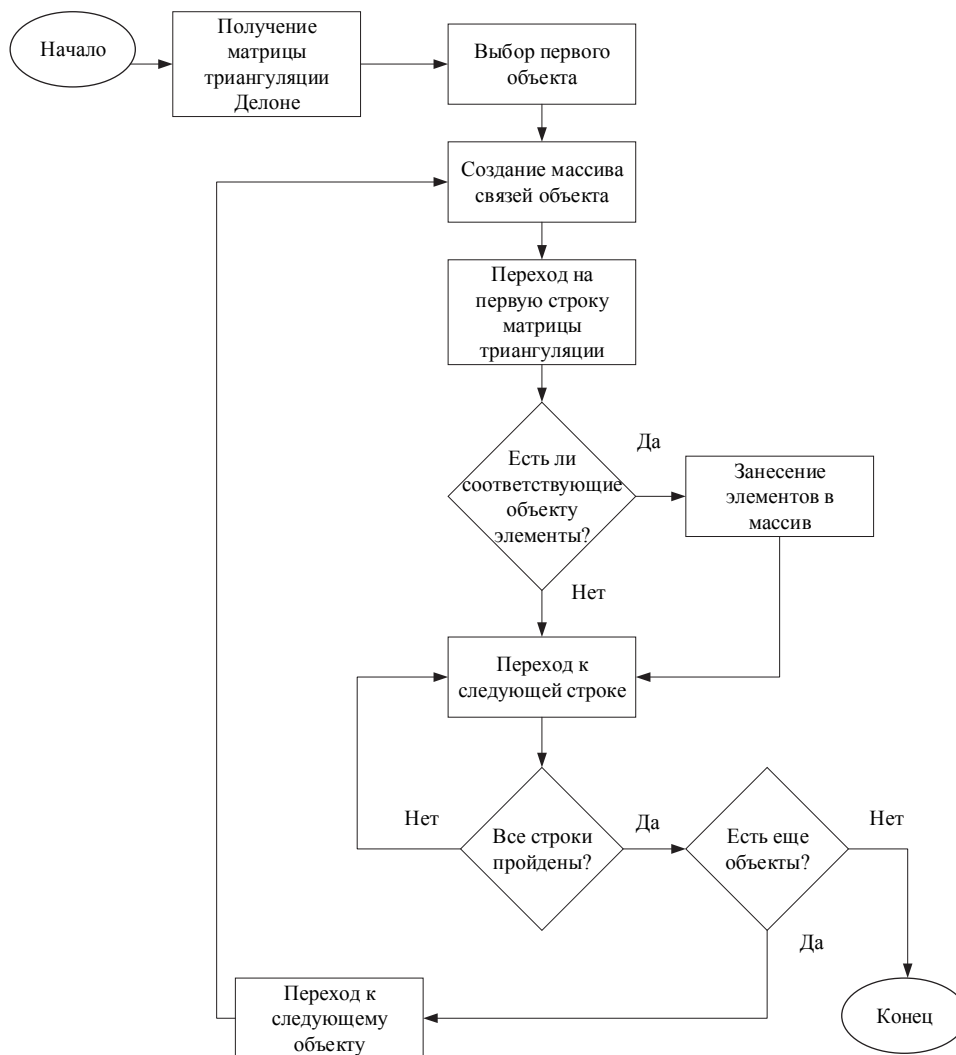


Рис. 3. Блок-схема алгоритма создания массива связей

Fig. 3. A flow chart of the creation algorithm of a relation array

Входными данными алгоритма, представленного на рис. 3, является матрица триангуляции Делоне, а на выходе алгоритма формируется массив свя-

зей подвижных объектов группы, полученных путем анализа всех строк матрицы триангуляции.

Далее производится обработка и сортировка массива связей, в ходе которой убираются повторяющиеся элементы и соседние элементы выстраиваются в порядке возрастания. В результате получаем матрицу соседей каждого подвижного объекта. В ней по одному разу перечислены номера соседей для данного подвижного объекта в порядке возрастания их порядковых номеров.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ

В этой главе будет проведено в Matlab численное моделирование группы, состоящей из пяти подвижных объектов в среде с неподвижными препятствиями. Также необходимо сравнить результаты моделирования работы предложенного метода и метода без кластеризации.

Параметры моделирования следующие:

- число подвижных объектов $n = 5$;
- начальные координаты подвижных объектов (1; 1), (5; 2), (10; 1), (12; 3), (15; 4);
- точки ограничений В1–В4 (0; 0), (0; 5), (20; 0), (20; 5);
- препятствие в виде стенки, ограниченной координатами (12; 8), (12,2; 8), (12,4; 8), (12,6; 8), а также точечное препятствие с координатами (2; 8).

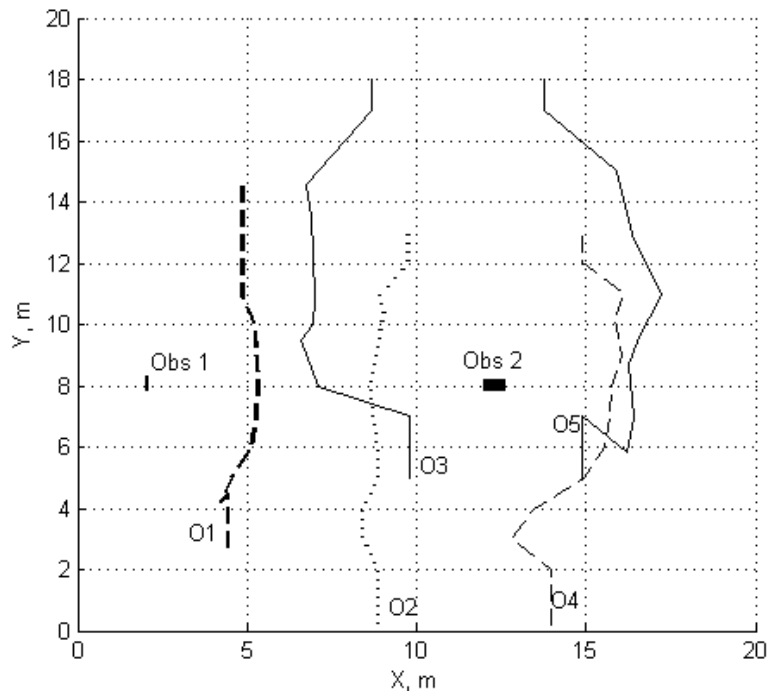


Рис. 4. Результаты моделирования без использования кластеризации

Fig. 4. Results of modeling without clustering

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Труды СПИИРАН. – 2018. – Вып. 5 (60). – С. 39–63.
2. *Тимофеев А.В.* Адаптивное управление и интеллектуальный анализ информационных потоков в компьютерных сетях. – М.: Анатолия, 2012. – 280 с.
3. Мультиагентные технологии в эргатических системах управления / К.В. Петрин, Е.Д. Теряев, А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3. – С. 7–13.
4. *Джунусов И.А., Фрадков А.Л.* Синхронизация в сетях линейных агентов с обратными связями по выходам // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 8. – С. 41–52.
5. *Зенкевич С.Л., Болотин Е.И.* Задача кластеризации распределенных систем на примере групповой кооперации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 8. – С. 28–33.
6. *Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А.* Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2001. – 32 с.
7. Overview of path planning and obstacle avoidance algorithms for UAVs: a comparative study / M. Radmanesh, M. Kumar, P.H. Guentert, M. Sarim // Unmanned Systems. – 2018. – Vol. 6 (2). – P. 95–118.
8. *Пшихопов В.Х.* Аттракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 117–123.
9. *Пшихопов В.Х.* Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 34–41.
10. *Медведев М.Ю., Лазарев В.С.* Алгоритм формирования траектории группы подвижных объектов в двумерной среде с использованием неустойчивых режимов // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 3 (64). – С. 17–29.
11. Distributed sampled-data control of nonholonomic multi-robot systems with proximity networks / Z. Liu, L. Wang, J. Wang, D. Dong, X. Hu // Automatica. – 2017. – Vol. 77. – P. 170–179.
12. Coordination control of wheeled mobile robots – a hybrid approach / R.M.K. Chetty, M. Singaperumal, T. Nagarajan, I. Tetsunari // International Journal of Computer Applications in Technology. – 2011. – Vol. 41 (3/4). – P. 195–204.
13. *Williams R.K., Sukhatme G.S.* Constrained interaction and coordination in proximity-limited multiagent systems // IEEE Transactions on Robotics. – 2013. – Vol. 29, iss. 4. – P. 930–944.
14. Интеллектуальные технологии планирования перемещений подвижных объектов в трехмерных недетерминированных средах / Д.А. Белоглазов, В.Ф. Гузик, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, А.О. Пьявченко, Р.В. Сапрыкин, В.В. Соловьев, В.И. Финаев ; под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Наука, 2017. – 232 с. – ISBN 978-5-2-39996-9.

Лазарев Владимир Сергеевич, преподаватель-исследователь, ассистент кафедры электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – групповое управление подвижными объектами. Имеет более 50 публикаций. E-mail: vlazarev@sfedu.ru

Медведев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления, робототехника. Имеет более 100 публикаций. E-mail: medvmihal@sfedu.ru

Lazarev Vladimir Sergeevich, a teacher-researcher, an assistant professor at the department of electrical engineering and mechatronics, Southern Federal University. The main field of his research is group control of mobile objects. He is the author of more than 50 publications. E-mail: vlazarev@sfedu.ru

Medvedev Mikhail Yurievich, D.Sc. (Eng.), professor, head of the department of electrical engineering and mechatronics, Southern Federal University. His research interests are focused on the theory of automatic control and robotics. He is the author of more than 100 publications. E-mail: medvmihal@sfedu.ru

A path planning method for a moving object group using clustering in a two-dimensional environment*

M.Yu. MEDVEDEV^a, V.S. LAZAREV^b

Southern Federal University, 2 Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russian Federation

^a medvmihal@sfedu.ru ^b vlazarev@sfedu.ru

Abstract

The problem of planning trajectories of a moving object group functioning in a two-dimensional environment with fixed obstacles is considered taking into account the maximization of the minimum distance between objects in the group. The environment contains obstacles whose location is not known in advance. The relevance of this problem was repeatedly emphasized in the papers of Russian and foreign scientists. The method is based on the use of the max-min problem for solving equations representing the distance from each moving object to the boundary of the functioning area and obstacles, as well as between the moving objects themselves in the group. To reduce the number of equations to be solved, the distance is calculated only for neighboring objects, for which clustering based on the Delaunay triangulation is used. Thus, the control system of a group of moving objects has two levels. The first is a clustering solution based on the Delaunay triangulation. At the second level, the max-min problem is solved, which allows one to arrange moving objects in the environment so as to maximize the minimum distance between any objects of the group: between moving objects, between moving objects and obstacles, as well as between moving objects and the boundaries of the functioning area. A numerical simulation of a group consisting of five moving objects in an environment with fixed obstacles is carried out. The results of modeling the operation of the proposed method and the method without clustering are compared. Further development of the proposed method for planning motion paths, including the adaptation of the method to a three-dimensional environment, is discussed.

Keywords: group control, moving object, max-min task, Delaunay triangulation, path planning

REFERENCES

1. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nykh robotov v neopredelennoi srede s ispol'zovaniem neustoiichivyykh rezhimov [Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2018, iss. 5 (60), pp. 39–63.
2. Timofeev A.V. *Adaptivnoe upravlenie i intellektual'nyi analiz informatsionnykh potokov v komp'yuternykh setyakh* [Adaptive control and intellectual analysis of information flows in computer networks]. Moscow, Anatoliya Publ., 2012. 280 p.
3. Petrin K.V., Teryaev E.D., Filimonov A.B., Filimonov N.B. Mul'tiagentnye tekhnologii v ergaticheskikh sistemakh upravleniya [Multiagent technologies in the ergatic control systems]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2010, no. 3, pp. 7–13.
4. Dzhunusov I.A., Fradkov A.L. Sinkhronizatsiya v setyakh lineinykh agentov s obratnymi svyazyami po vykhodam [Synchronization in networks of linear agents with output feedbacks]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2011, no. 8, pp. 41–52. (In Russian).

* Received 20 September 2019.

This research is supported by Russian Science Foundation (grant 16-19-00001) and research work SP-4658.2018.5 (competition SP-2018)(part 3).

5. Zenkevich S.L., Bolotin E.I. Zadacha klasterizatsii raspredelennykh sistem na primere gruppovoi kooperatsii [Clusterization of distributed systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2013, no. 8, pp. 28–33.
6. Platonov A.K., Kiril'chenko A.A., Kolganov M.A. *Metod potentsialov v zadache vybora puti: istoriya i perspektivy* [The potential field approach in the path finding problem: history and perspectives]. Moscow, Keldysh Institute of Applied Mathematics Publ., 2001. 32 p.
7. Radmanesh M., Kumar M., Guentert P.H., Sarim M. Overview of path planning and obstacle avoidance algorithms for UAVs: a comparative study. *Unmanned Systems*, 2018, vol. 6 (2), pp. 95–118.
8. Pshikhopov V.Kh. Attraktory i repellery v konstruirovanii sistem upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Attractors and repellers in the design of control systems of mobility-governmental entities]. *Izvestiya TRTU – Izvestiya TSURE*, 2006, no. 3 (58), pp. 117–123.
9. Pshikhopov V.Kh. Organizatsiya repellerov pri dvizhenii mobil'nykh robotov v srede s prepyatstviyami [Repellers forming in the process of mobile robots movements in environment with obstacles]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2008, no. 2, pp. 34–41.
10. Medvedev M.Yu., Lazarev V.S. Algoritm formirovaniya traektorii gruppy podvizhnykh ob"ektov v dvumernoi srede s ispol'zovaniem neustoiichivykh rezhimov [Movement control algorithm for a vehicle group in 2-D environments using unstable modes]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (64), pp. 17–29.
11. Liu Z., Wang L., Wang J., Dong D., Hu X. Distributed sampled-data control of nonholonomic multi-robot systems with proximity networks. *Automatica*, 2017, vol. 77, pp. 170–179.
12. Chetty R.M.K., Singaperumal M., Nagarajan T., Tetsunari I. Coordination control of wheeled mobile robots – a hybrid approach. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2011, vol. 41 (3/4), pp. 195–204.
13. Williams R.K., Sukhatme G.S. Constrained interaction and coordination in proximity-limited multiagent systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, vol. 29, iss. 4, pp. 930–944.
14. Beloglazov D.A., Guzik V.F., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., P'yavchenko A.O., Saprykin R.V., Solov'ev V.V., Finaev V.I. *Intellektual'nye tekhnologii planirovaniya peremeshchenii podvizhnykh ob"ektov v trekhmernykh nedeterminirovannykh sredakh* [Intelligent technologies for planning the movement of moving objects in three-dimensional non-deterministic environments]. Ed. by V.Kh. Pshikhopov. Moscow, Nauka Publ., 2017. 232 p. ISBN 978-5-2-39996-9.

Для цитирования:

Медведев М.Ю., Лазарев В.С. Метод формирования траектории для группы подвижных объектов с помощью кластеризации в двумерной среде // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 45–54. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-45-54.

For citation:

Medvedev M.Yu., Lazarev V.S. Metod formirovaniya traektorii dlya gruppy podvizhnykh ob"ektov s pomoshch'yu klasterizatsii v dvumernoi srede [A path planning method for a moving object group using clustering in a two-dimensional environment]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 45–54. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-45-54.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 004.82

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-55-70

Коалиционная работа мобильных роботов и людей в социоконвергентной системе на базе онтологического подхода*

Н.Н. ТЕСЛЯ^{1,а}, М.Н. ЧЕМОДАНОВ^{2,б}, П.Н. КРАСИЛЬНИКОВ^{2,с}

¹ 199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)

² 190121, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

^а teslya@ias.spb.su ^б chemodanov@smtu.ru ^с opakras@gmail.com

Мобильные роботы становятся в последние годы неотъемлемой частью жизни современного человека. Широкое распространение роботов-пылесосов, роботов-газонокосилок, роботов – мойщиков окон и других подобных устройств позволяет автоматизировать повседневные задачи человека. Революционный прогресс в области робототехники позволил создавать мощные ресурсоэффективные устройства, которые ориентированы на решение усложняющихся с каждым годом задач. При этом часто возникают задачи, для решения которых эффективно использовать несколько устройств, которые объединяются в коалиции между собой, а также с людьми. Для таких систем был предложен термин «социоконвергентные системы», тесно интегрирующий физические устройства с людьми и поддерживающий их взаимодействие в информационном пространстве. В статье представлен онтологоориентированный подход к совместной работе мобильных роботов в социоконвергентной системе. В качестве примера для такого взаимодействия был рассмотрен сценарий преодоления препятствий высокопроходимым мобильным роботом, взаимодействующим с квадрокоптером, для оценки этого препятствия и человеком-оператором, который берет на себя управление роботом в том случае, если преодоление препятствия в автоматическом режиме невозможно. Для апробации подхода были разработаны имитационные модели роботов в среде моделирования Gazebo, которые позволили проверить работоспособность предложенного подхода.

Ключевые слова: социоконвергентная система, мобильные роботы, Gazebo, сценарий преодоления препятствий, онтология, контекст, коалиционная работа, информационное взаимодействие

* Статья получена 02 сентября 2019 г.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом Российской академии наук, «Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники». Предложенный онтологический подход выполнен в рамках проекта РФФИ 16-29-04349. Имитационные модели роботов были спроектированы в рамках проекта РФФИ 17-29-07073.

ВВЕДЕНИЕ

Повсеместное развитие робототехники в последние годы непрерывно усложняет задачи, которые решаются мобильными роботами [1–3]. При этом появляются сложные задачи, которые требуют коалиционной работы нескольких гетерогенных роботов совместно с людьми.

В статье представлен подход к коалиционной работе мобильных роботов и людей в социокиберфизической системе на базе онтологического подхода. Для проверки работоспособности подхода были разработаны их имитационные модели в среде моделирования Gazebo и реализован сценарий формирования коалиций мобильными роботами и человеком-оператором для преодоления препятствий.

Для взаимодействия роботов между собой, а также с другими информационными компонентами было предложено использовать концепцию социокиберфизических систем, предполагающую наличие множества ресурсов, взаимодействующих между собой в информационном пространстве и управляющих устройствами в физическом пространстве в режиме реального времени. При этом такая система включает в себя также социальное пространство, которое объединяет в себе людей, участвующих в выполнении задач совместно с мобильными роботами. При этом они базируются на инфраструктурах, обеспечивающих связь, вычисления, управление и объединяющих сенсоры, вычислительные устройства, сервисы и средства коммуникаций [2]. В настоящей работе к физическим устройствам относятся мобильные роботы, управляемые соответствующими программными компонентами, однако в общем виде это любое управляемое устройство, совершающее некоторое воздействие или измеряющее параметры в физическом пространстве.

Статья организована следующим образом. В первом разделе рассматриваются актуальные исследования в области коалиционной работы мобильных роботов и робототехнического имитационного моделирования. Второй раздел посвящен предлагаемому подходу к формированию коалиций роботов и людей. Третий раздел описывает имитационную модель мобильных роботов в среде моделирования Gazebo. В четвертом разделе описан предложенный сценарий формирования коалиций для задачи преодоления препятствий мобильными роботами. В заключении представлены итоги, полученные в ходе работы над статьей.

1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время основной интерес исследователей при решении задачи коалиционной работы мобильных роботов сосредоточен вокруг следующих вопросов: организация коалиции, обмен информации между участниками коалиции, распределение задач и ресурсов между участниками коалиции.

В процессе организации коалиции можно выделить два крупных направления: централизованная организация и децентрализованная организация [3]. Централизованная организация коалиции отличается наличием командного центра, на котором принимаются решения о составе коалиции, распределении задач и формируется план решения задачи. При этом командный центр может быть представлен как отдельным вычислительным устройством,

выполняющим только функции центра, так и роботом, выполняющим задания наравне с остальными [4]. Структура коалиции в этом случае может быть многоуровневой иерархической, в которой роботы на каждом нижележащем уровне подчиняются только одному центру их вышележащего уровня [5]. Децентрализованная организация коалиции подразумевает, как правило, отсутствие центра принятия решений, часто ориентируясь на биоинспирированные методы организации совместной работы, такие как роевые и стайные [6, 7]. При этом роботы считаются равными по иерархии и руководствуются одинаковыми алгоритмами при принятии решения.

Обмен информации между участниками коалиции является важной составляющей коалиционного решения задачи, поскольку совместное решение задач требует оповещения участников коалиции о текущем состоянии решения задачи для организации слаженных действий либо контроля выполнения плана [10]. Обмен информацией может быть организован посредством общего централизованного хранилища информации на отдельном устройстве или распределением информации между членами коалиции [12]. Также рассматривается объединение двух подходов с образованием интеллектуальных пространств – создание общего хранилища информации, предоставляющего ссылки на ресурсы, которыми являются участники коалиции, что делает информацию распределенной между всеми участниками [11]. Существуют также решения на базе peer2peer сетей и распределенного реестра, обеспечивающие быстрое распределение информации между всеми участниками, дублируя при этом всю информацию на устройстве каждого участника [8, 9]. Решения на базе распределенного реестра также предоставляют защиту информации от перезаписи, что может быть полезно при организации коалиции с требованием обеспечения доверия между участниками без наличия единого удостоверяющего центра [9].

Тип организации коалиции также влияет на способы распределения задач и ресурсов между участниками коалиции. Централизованные иерархические коалиции, как правило, организуют работу посредством централизованного планирования при поступлении задачи. На вышестоящих узлах строится план работ с учетом возможностей нижестоящих узлов и ресурсов коалиции, в котором зафиксированы исполнители и порядок решения задач [13]. За счет этого обеспечивается гарантия выполнения этапов плана и всего плана к определенному сроку с точным прогнозом расходования ресурсов и выплаты вознаграждения, если это предусмотрено условиями задачи. Однако данное решение не является гибким, поскольку при возникновении нештатной ситуации происходит отклонение от плана с необходимостью его коррекции или полного перестроения. Децентрализованные коалиции основаны на адаптации участников к текущим условиям с отсутствием единого плана решения задачи [14, 15]. Это обеспечивает гибкость решения задачи в условиях частых изменений состава коалиции или доступных ресурсов, но ограничивает возможность прогнозирования момента решения задачи [16].

Также отдельное внимание следует уделить имитационному и визуальному моделированию взаимодействия роботов, поскольку данный подход существенно упрощает проверку гипотез за счет снижения стоимости разработки, а также наглядно представляет результаты работы предлагаемых гипотез. Часть исследователей разрабатывает собственные визуализации, отобра-

жая роботов условными знаками, поскольку рассматриваемые задачи не требуют детализации конструкции робота [3, 6]. Для детальной визуализации чаще всего используется пакет визуализации Gazebo в комбинации с управляющим кодом операционной системы робота (Robot operation system, ROS) для управления виртуальным роботом [17–20].

Резюмируя рассмотренные направления исследований, можно отметить, что в настоящее время основное внимание уделяется созданию децентрализованных коалиций роботов для решения общей задачи. Распределение задач и ресурсов между ними осуществляется на основе децентрализованного планирования для адаптации к изменяющемуся контексту задачи, при этом роботы принимают участие в решении задачи на основе имеющегося функционала и доступных ресурсов, таких как заряд батареи или рабочий ресурс устройств. Взаимодействие и обмен информацией между роботами осуществляется посредством общего хранилища, однако последние исследования смещены в сторону децентрализации на основе peer2peer модели и использования распределенных реестров. При отсутствии возможности проверки моделей взаимодействия на реальных роботах используются среды визуализации для моделирования роботов и их действий. Наиболее часто используемой связкой является среда моделирования Gazebo вместе с операционной системой для роботов ROS, реализующей функционал роботов.

2. ПОДХОД К ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ РОБОТОВ И ЛЮДЕЙ

Онтологический подход к взаимодействию роботов и людей в социкиберфизической системе (рис. 1) ориентирован на автоматическое формирование коалиций участников для решения возникающей задачи. Каждый участник социкиберфизической системы описывается с использованием онтологии, определяющей набор возможных действий, которые он может выполнять, и ограничений, которые должны быть удовлетворены для выполнения этих действий [21, 22]. Под онтологией понимается подробная спецификация модели предметной области. Она включает в себя словарь (т. е. список логических констант и предикатных символов) для описания предметной области и набор логических высказываний, формулирующих существующие в данной проблемной области ограничения и определяющих интерпретацию словаря. На основе онтологии и задачи, которая должна быть выполнена коалицией участников, формируется абстрактный контекст участника, который представляет собой срез его онтологии, релевантный задаче. На основе абстрактного контекста и оперативной информации (датчики, информационные ресурсы и т. п.) строится оперативный контекст, который публикуется в информационном пространстве. Таким образом, информационное пространство содержит в себе базу знаний об участниках социкиберфизической системы с информацией об их текущем состоянии в данный момент времени. На основе этой базы знаний в информационном пространстве происходит поиск тех участников, которые способны решить задачу эффективным способом. Таким образом формируется виртуальная коалиция участников социкиберфизической системы, а физическая коалиция будет включать в себя тех участников, абстрактные контексты которых были затронуты при формировании виртуальной коалиции [23, 24].

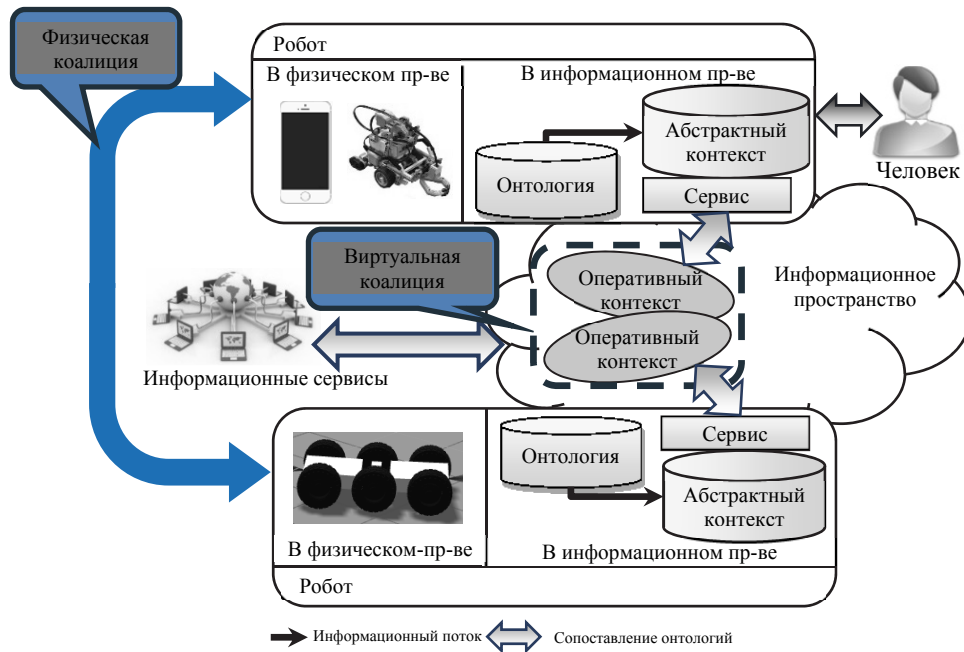


Рис. 1. Онтологический подход к взаимодействию роботов и людей в социокберфизической системе

Fig. 1. Ontology-based approach to interaction of robots and people in cyber-physical-social system

Сопоставление онтологий является ключевым для рассматриваемого подхода [25], так как в том случае, если онтологии двух роботов будут разработаны таким образом, что схожие их части не будут сопоставлены, то данные роботы не смогут участвовать в одной коалиции. Таким образом, можно констатировать факт того, что если онтологии будут разработаны на базе одной метаонтологии, то сопоставление будет работать эффективно. Однако если онтологии будут разработаны различными экспертами с использованием разнородных понятий, то вероятность сопоставления будет снижаться. Для этого авторами был разработан подход к сопоставлению онтологий на основе технологии краудсорсинга [26].

3. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СРЕДЕ GAZEBO

Для проведения экспериментов были реализованы следующие модели роботов в среде моделирования Gazebo [27] с использованием фреймворка ROS Melodic [28]. Использование вышеперечисленного программного обеспечения широко распространено в настоящее время в области моделирования робототехнических средств и включает в себя разнообразную библиотеку элементов и готовых аппаратов, позволяющих существенно сократить время разработки моделей.

Модель № 1. Робот-манипулятор повышенной проходимости, обладающий следующими характеристиками.

- Робот состоит из трех независимых частей: передней, центральной и задней.
- Робот имеет шесть колес с приводами на каждое колесо для перемещения на плоскости.
- Передняя и задняя части обладают механизмами поднимания / опускания для преодоления препятствий.
- На передней и задней частях робота расположены датчики для определения расстояния до объектов, направленные параллельно плоскости движения робота.
- Робот оснащен датчиком координат для отслеживания местоположения.

Модель № 2. Робот-квадрокоптер.

- Робот обладает функционалом стандартного квадрокоптера для перемещения в пространстве.
- Робот оснащен датчиком датчика дальности для сканирования препятствия, направленным вниз.
- Робот оснащен датчиком координат для отслеживания местоположения.

Модель № 3. Робот-скаут.

- Четырехколесный мобильный робот с функцией перемещения на плоскости.
- Робот оснащен датчиками датчиков дальности, расположенных по периметру корпуса робота для сканирования объектов.
- Робот оснащен датчиком координат для отслеживания местоположения.

Рассмотрим подробнее модель № 1, описывающую робота-манипулятора повышенной проходимости. Кинематическая схема робота, а также расположение сенсоров и обозначение частей модели приведено на рис. 2.

Как видно из схемы, робот состоит из трех частей: передней, центральной и задней. Робот обладает шестью независимыми мотор-колесами с приводами на каждом из них 1, а также двумя гидравлическими цилиндрами, отвечающими за линейные перемещения передней и задней частей относительно центральной части 2. Кроме того, робот обладает возможностью управления поворотом передней и задней частей в вертикальной оси.

Представленная модель робота (составные части, связи между ними, массогабаритные и расчетные параметры) определяется в следующем файле проекта: `6w_moon_walker/moon.src.urdf/rmoon.urdf`. За управление отвечает `MYROBOT_control/config/moon_control.yaml`, в котором описаны ПИД-регуляторы приводов.

Для управления приводами робота был разработан интерфейс (ROS Node) на языке python (файл `moon_controller/src/keyboard_control.py`), обеспечивающий базовые функции управления роботом с использованием клавиатуры. В данном скрипте выполняется привязка нажатий клавиш к отправке команд в ROS topics. Команды управления роботом и описание их реализации приведено в таблице.

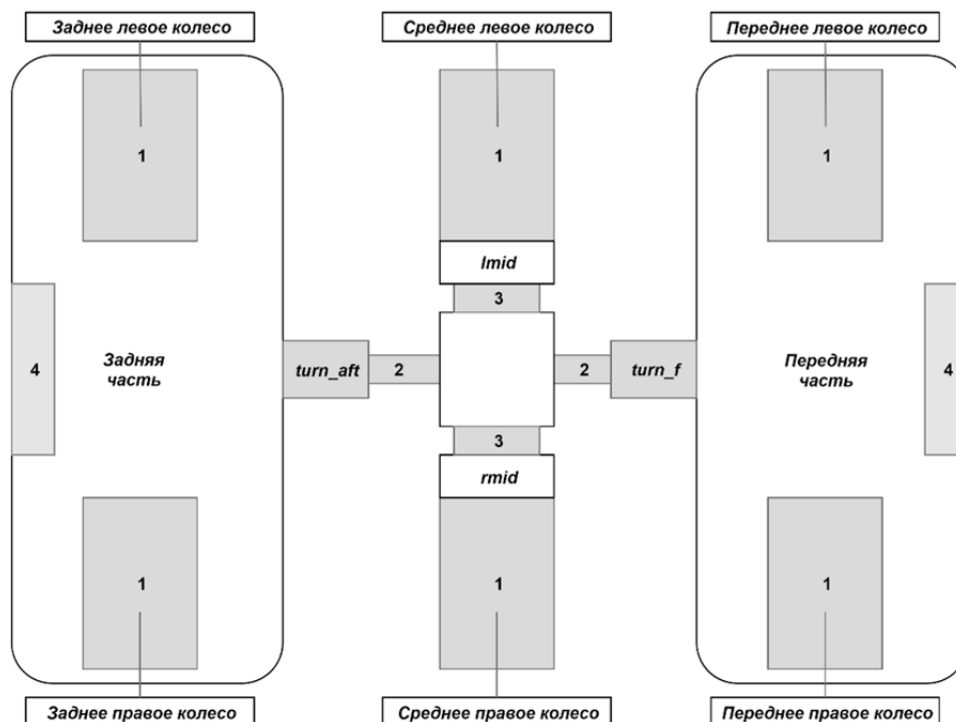


Рис. 2. Кинематическая схема робота-манипулятора:

1 – приводы колес; 2 – линейные приводы перемещения передней и задней частей; 3 – приводы вращения передней и задней частей в вертикальной плоскости; 4 – ультразвуковые дальномеры

Fig. 2. Kinematic scheme of manipulating robot:

1 – wheel drives; 2 – linear drives for moving front and back parts; 3 – drives for turning of front and back parts in vertical axis; 4 – ultrasonic sensors.

Команды управления моделью робота-манипулятора повышенной проходимости

Commands for controlling the model of manipulating robot

№	Клавиши	Движение
1	w / x	Вперед / Назад
2	s	Остановка
3	a / d	Поворот влево / вправо
4	f / r	Управление вертикальным углом
5	t / g	Управление передним гидроцилиндром
6	y / h	Управление задним гидроцилиндром

Модели роботов, реализующие функционал роботов квадрокоптера и скаута, были взяты из открытых библиотек для ROS и Gazebo и являются наиболее популярными на сегодняшний день для робототехнического моделирования в данных средах. Модель № 2, реализующая функционал робота квадрокоптера, была реализована на базе пакета `hector_quadrotor` [29]. Пакет `hector_quadrotor` был разработан в Дармштадтском техническом университете и содержит описание робота в формате `urdf`, а также параметры, необходимые для симуляции, пакет для телеуправления и большое количество пакетов для симуляции различных аспектов работы квадрокоптера.

Модель № 3, реализующая функционал робота-скаута, была реализована на базе пакета `husky_gazebo` [30]. Пакет `husky_gazebo` разработан фирмой Clearpath Robotics для симуляции своего серийно изготавливаемого робота Husky и аналогичен пакету `hector`, содержит описание робота в формате `urdf` и различные примеры работы с роботом.

На рис. 3 показана схема управления роботом-манипулятором. В овалах представлены основные узлы модели ROS (ROS nodes), а в прямоугольниках – основные каналы передачи сообщений (ROS topics). Модуль (ROS Node) `roscad_teleop` отвечает за управление роботом с клавиатуры, а модуль `gazebo` является стандартным модулем симулятора Gazebo.

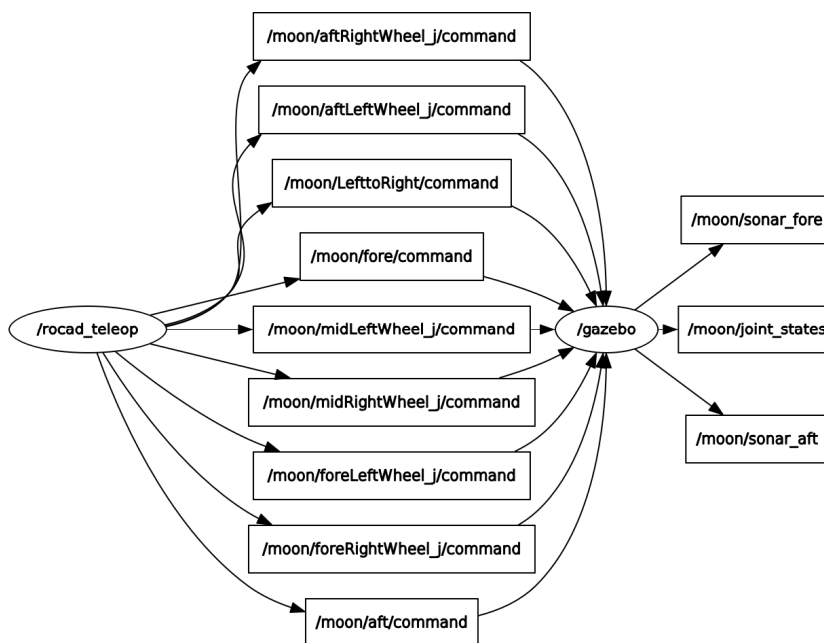


Рис. 3. Схема каналов (ROS topic) передачи данных в модели робота-манипулятора

Fig. 3. ROS topics scheme for data transfer in manipulating robot model

Для управления роботом используются следующие каналы сообщений: управление скоростями вращения колес `/moon/[*1][*2]Wheel_j/command`, где `[*1]` – это задняя, средняя или передняя часть модели, а `[*2]` – левая или правая сторона робота.

Для управления задними и передними гидроцилиндрами используются каналы `/moon/aft/command` и `/moon/fore/command` соответственно. Канал `/moon/LefttoRight/command` отвечает за сгибание робота в центральной части.

Чтобы получать информацию о стоянии робота, необходимо подписаться на канал `/moon/joint_state`. Информацию от заднего и переднего датчиков можно получить по каналам `/moon/sonar_aft` и `/moon/sonar_fore` соответственно.

4. СЦЕНАРИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОБОТОВ

Для оценки предложенного подхода и имитационной модели был предложен сценарий формирования человеко-машинных гетерогенных коалиций для задачи преодоления препятствий роботом-манипулятором повышенной проходимости. Данный колесный робот способен преодолевать сложные препятствия, высота которых больше, чем радиус его колеса, за счет подъема передней и задней частей и приводов на все шесть колес. При этом управление данным роботом человеком-оператором является сложным процессом, поскольку предполагает одновременное управление подвижностью большого числа элементов.

В рассматриваемом сценарии предложено динамически формировать человеко-машинную коалицию для совместной работы по преодолению препятствия в зависимости от контекста. В такую коалицию будет обязательно входить робот-манипулятор, робот-квадрокоптер или робот-скаут в зависимости от препятствия, с которым столкнулся робот-манипулятор, и местности, на которой они находятся, и опционально человек-оператор. Подробная схема предложенного сценария представлена на рис. 4.

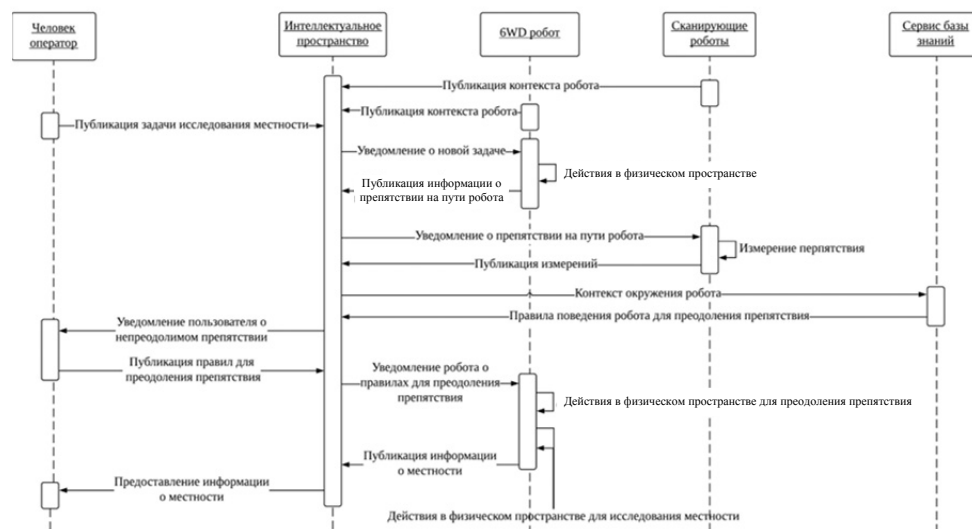


Рис. 4. Сценарий формирования человеко-машинной гетерогенной коалиции

Fig. 4. Scenario for human-machine coalition formation

Взаимодействие участников сценария осуществляется на базе платформы Smart-M3 [31]. Данная платформа является свободно распространяемым программным обеспечением для реализации концепции интеллектуальных пространств. Основной идеей этой концепции является возможность публикации / подписки информации и знаний участников коалиции с использованием семантических информационных брокеров посредством RDF-онтологий. Примером такой информации может служить следующий RDF-триплет:

<"robot", "task", "goToLocation">.

В данном случае субъект "robot" описывает конкретного робота, который должен проследовать в конкретную точку ("goToLocation") на плоскости для выполнения задачи "task".

В то же время объект "goToLocation" является субъектом для следующего триплета:

<"goToLocation", "coordinates", "40; 200">.

Участники, подключенные к платформе Smart-M3, имеют возможность подписываться на RDF-триплеты, которые публикуются другими участниками в информационном пространстве, и получать уведомления о появлении такой информации.

Пример симуляции разработанных моделей роботов для задачи коалиционной работы мобильных роботов при преодолении препятствий приведен на рис. 5. Робот-манипулятор повышенной проходимости передвигается на плоскости и сталкивается с препятствием. Задачей робота-квадрокоптера и робота-скаута является сканирование препятствия таким образом, чтобы роботу-манипулятору было понятно, каким образом его преодолеть или констатировать факт невозможности преодоления препятствия в автоматическом режиме и необходимости прибегнуть к помощи человека-оператора.

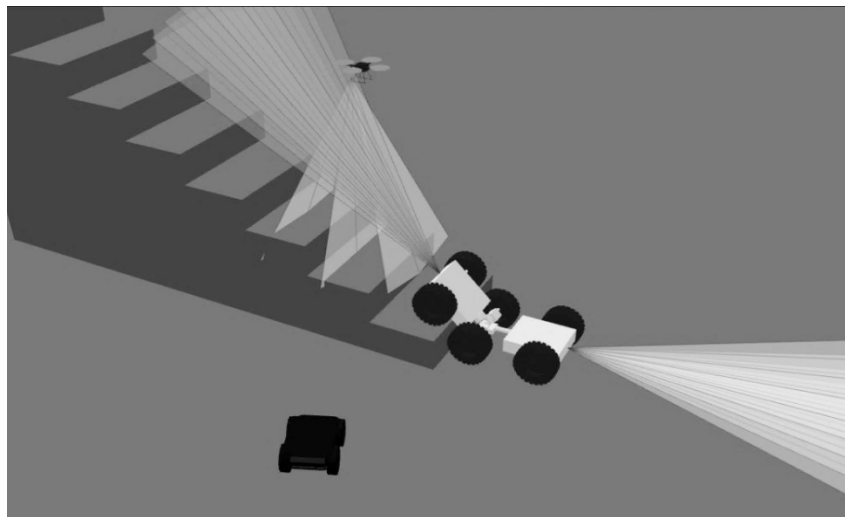


Рис. 5. Пример симуляции разработанных моделей роботов для задачи коалиционной работы мобильных роботов при преодолении препятствий

Fig. 5. Example of the developed models simulation for the obstacle overcoming task

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен подход к коалиционной работе мобильных роботов и людей в социкиберфизических системах. Подход базируется на основе онтологического моделирования возможностей и ограничений мобильных роботов. Подход был апробирован при реализации сценария взаимодействия роботов и человека-оператора для задачи преодоления препятствий роботом-манипулятором повышенной проходимости, который работает совместно с роботом-квадрокоптером или роботом-скаутом. Робот-манипулятор способен преодолевать сложные препятствия, высота которых больше, чем радиус его колеса, за счет подъема передней и задней частей и приводов на все шесть колес. При этом управление данным роботом человеком-оператором является сложным процессом, поскольку предполагает одновременное управление подвижностью большого числа элементов. Сценарий был апробирован в среде моделирования Gazebo. Для этой цели была разработана имитационная модель робота-манипулятора. Модели робота-квадрокоптера и робота-скаута были взяты стандартные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Негрете М., Саваж Х., Контрерас-Толедо Л.Э.* Система планирования движения бытового сервисного робота на основе алгоритмов пространственного представления и активной навигации // Труды СПИИРАН. – 2018. – Вып. 5 (60). – С. 5–38. – Текст англ.
2. *Безрук Г.Г., Мартынова Л.А., Саенко И.Б.* Динамический метод поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Труды СПИИРАН. – 2018. – Вып. 3(58). – С. 203–226.
3. *Пищопов В.Х., Медведев М.Ю.* Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Труды СПИИРАН. – 2018. – Вып. 5 (60). – С. 39–63.
4. Многоуровневая самоорганизация ресурсов киберфизической системы: контекстно-ориентированный подход и реализация / А.В. Смирнов, А.М. Кашевник, С.А. Михайлов, М.Д. Миронов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – Вып. 4. – С. 3–11.
5. *Guerrero J., Oliver G., Valero O.* Multi-robot coalitions formation with deadlines: complexity analysis and solutions // Plos One. – 2017. – Vol. 12, N 1. – P. 1–26.
6. *Koes M, Nourbakhsh I, Sycara K.* Heterogeneous multirobot coordination with spatial and temporal constraints // 20th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI). – Boston, USA, 2005. – P. 1292–1297.
7. *Yu L, Cai Z.* Robot exploration mission planning based on heterogeneous interactive cultural hybrid algorithm // 5th International Conference on Natural Computation. – Tianjin, China, 2009. – P. 583–587.
8. *Qian B., Cheng H.H.* Bio-inspired coalition formation algorithms for multirobot systems // Journal of Computing and Information Science in Engineering. – 2018. – Vol. 18, N 2. – P. 1–8.
9. *Liang X., Xiao Y.* Studying bio-Inspired coalition formation of robots for detecting intrusions using game theory // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B. – 2010. – Vol. 40, N 3. – P. 683–693.
10. A block chain based architecture for asset management in coalition operations / D. Verma, N. Desai, A. Preece, I. Taylor // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10190. – P. 01900Y–01900Y-9.
11. *Ferrer E.C.* The blockchain: a new framework for robotic swarm systems // Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2018. – Cham: Springer, 2019. – Vol. 2. – P. 1037–1058. – (Advances in Intelligent Systems and Computing; vol. 881).

12. *Shabanov V., Ivanov D.* Organization of information exchange in coalitions of intelligent mobile robots // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. – Sochi, Russia, 2019. – P. 1–5.
13. Smart-M3-based robots self-organization in pick-and-place system / A. Smirnov, A. Kashevnik, N. Teslya, S. Mikhailov, A. Shabaev // 2015 17th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – Yaroslavl, Russia, 2015. – P. 210–215.
14. *Hartanto R., Eich M.* Reliable, cloud-based communication for multi-robot systems // 2014 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA). – Woburn, MA, USA, 2014. – P. 1–8.
15. Cloud-based task planning for smart robots / E. Tosello, Z. Fan, A.G. Castro, E. Pagello // Intelligent Autonomous Systems 14. – Cham: Springer, 2017. – P. 285–300. – (Advances in Intelligent Systems and Computing; vol. 531).
16. *Ivanov D.* Decentralized planning of intelligent mobile robot's behavior in a group with limited communications // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Cham: Springer, 2019. – Vol. 875. – P. 418–427.
17. Task allocation of intelligent warehouse picking system based on multi-robot coalition / F. Xue, H. Tang, Q. Su, T. Li // KSII Transactions on Internet and Information Systems. – 2019. – Vol. 13, N 7. – P. 3566–3582.
18. *Alkilabi M.H.M., Narayan A., Tuci E.* Cooperative object transport with a swarm of e-puck robots: robustness and scalability of evolved collective strategies // Swarm Intelligence. – 2017. – Vol. 11, N 3–4. – P. 185–209.
19. Multi-robot mission planning with static energy replenishment / B. Li, B. Moridian, A. Kamal, S. Patankar, N. Mahmoudian // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2019. – Vol. 95 (2). – P. 745–759.
20. Guiding autonomous exploration with signal temporal logic / F.S. Barbosa, D. Duberg, P. Jensfelt, J. Tumova // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Vol. 4, N 4. – P. 3332–3339.
21. Robust collaborative object transportation using multiple MAVs / A. Tagliabue, M. Kamel, R. Siegwart, J. Nieto // International Journal of Robotics Research. – 2019. – Vol. 38 (9). – P. 1020–1044.
22. A complete workflow for automatic forward kinematics model extraction of robotic total stations using the Denavit-Hartenberg convention / C. Klug, D. Schmalstieg, T. Gloor, C. Arth // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2018. – Vol. 95. – P. 311–329.
23. *Калязина Д., Кашевник А.* Разработка и оценка онтологии социокиберфизической системы на основе анализа типовых сценариев использования мобильных роботов // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 21–36. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36.
24. *Petrov M., Kashevnik A.* Ontology-based indirect interaction of mobile robots for joint task solving: a scenario for obstacle overcoming // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 113. – Art. 02013. – P. 1–6.
25. Kashevnik A., Teslya N. Blockchain-oriented coalition formation by CPS resources: ontological approach and case study // Electronics. – 2018. – Vol. 7 (5). – P. 1–16.
26. Context-based coalition creation in human-robot systems: approach and case study / Smirnov A., Kashevnik A., Petrov M., Parfenov V. // Interactive Collaborative Robotics: 2nd International Conference, ICR-2017: Proceedings. – Cham: Springer, 2017. – P. 229–238. – (Lecture Notes in Artificial Intelligence; vol. 10459).
27. Ontology matching for socio-cyberphysical systems: an approach based on background knowledge / A. Smirnov, N. Teslya, S. Savosin, N. Shilov // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. ruSMART 2017, NsCC 2017, NEW2AN 2017. – Cham: Springer, 2017. – P. 29–39. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 10531).
28. *Kashevnik A., Smirnov A., Teslya N.* Ontology-based interaction of mobile robots for coalition creation // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems. – 2018. – Vol. 9 (2). – P. 63–78.

29. Среда моделирования Gazebo [Электронный ресурс]: web-сайт. – URL: <http://gazebosim.org/> (дата обращения: 12.12.2019).

30. Фреймворк ROS Melodic [Электронный ресурс]. – URL: <http://wiki.ros.org/melodic> (дата обращения: 12.12.2019).

31. Пакет hector_quadrotor [Электронный ресурс]. – URL: http://wiki.ros.org/hector_quadrotor (дата обращения: 12.12.2019).

32. Пакет husky_gazebo [Электронный ресурс]. – URL: http://wiki.ros.org/husky_gazebo/Tutorials/Simulating%20Husky (дата обращения: 12.12.2019).

33. *Korzun D.; Kashevnik A.; Balandin S.* Novel design and the applications of smart-M3 platform in the internet of things: emerging research and opportunities. – Hershey, PA: IGI Global, 2017. – 150 p. – (Advances in Web Technologies and Engineering). – ISBN 9781522526537.

Тесля Николай Николаевич, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Основные направления научных исследований: робототехника, умный город, онтологическое моделирование, управление знаниями, интеллектуальные транспортные системы. Имеет 62 публикации. E-mail: teslya@iias.spb.su

Чемоданов Михаил Николаевич, начальник студенческого конструкторского бюро Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Основное направление научных исследований – робототехника, моделирование. Имеет 10 публикаций. E-mail: chemodanov@smtu.ru

Красильников Павел Николаевич, студент Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Основное направление научных исследований – робототехника, моделирование. E-mail: opakras@gmail.com

Teslya Nikolai Nikolaevich, a senior research fellow in St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPII RAS). The main field of his research is robotics, a smart city, ontological modeling, knowledge management, and intelligent transport systems. He is the author of 62 publications. E-mail: teslya@iias.spb.su

Chemodanov Mikhail Nikolaevich, head of the students' design bureau, St. Petersburg state marine technical university (SMTU). The main field of his research is robotics and modeling. He has published 10 research papers. E-mail: chemodanov@smtu.ru

Krasilnikov Pavel Nikolaevich, student, St. Petersburg state marine technical university (SMTU). The main field of his research is robotics and modeling. E-mail: opakras@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-55-70

Coalition-oriented mobile robot and people operation in social cyber-physical-systems based on the ontological approach*

N.N. TESLYA^{1,a}, M.N. CHEMODANOV^{2,b}, P.N. KRASILNIKOV^{2,c}

¹ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, 39, 14 Line, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

² St. Petersburg State Marine Technical University, 3 Lotsmanskaya Street, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

^a teslya@iias.spb.su ^b chemodanov@smtu.ru ^c opakras@gmail.com

Abstract

In recent years mobile robots have become an important part of human life. A widespread use of vacuum cleaners, lawnmowers, window cleaning robots and other similar devices allows us to automate everyday human tasks. Revolutionary progress in the field of robotics allowed us to create powerful resource-efficient devices that are focused on solving tasks getting more complicated every year. At the same time, problems often arise for whose solution it is effective to use several devices that are combined in a coalition among themselves, as well as with people. For such systems, the term socio-cyber-physical systems was proposed, which closely integrate physical devices with people and support their interaction in the information space. The paper presents an ontology-oriented approach to the joint work of mobile robots in a socio-cyber-physical system. As an example of such interaction, the scenario of overcoming obstacles by a high-pass mobile robot interacting with a quadcopter to assess this obstacle and a human operator who takes control of the robot if it is impossible to overcome the obstacle in an automatic mode was considered. To test the approach, simulation models of robots were developed in the Gazebo simulation environment, which allowed us to test the efficiency of the proposed approach.

Keywords: socio-cyber-physical system, mobile robots, ontology, Gazebo, obstacle overcoming scenario

REFERENCES

1. Negrete M., Savage J., Contreras L. A motion-planning system for a domestic service robot. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2018, iss. 5 (60), pp. 5–38.
2. Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B. Dinamicheskii metod poiska antropogennykh ob'ektov v morskoye dne s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Dynamic method of searching anthropogenic objects in seabed with use of autonomous underwater vehicles]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2018, iss. 3 (58), pp. 203–226.
3. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nykh robotov v neopredelennoy srede s ispol'zovaniem neustoychivyykh rezhimov [Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2018, iss. 5 (60), pp. 39–63.
4. Smirnov A.V., Kashevnik A.M., Mikhailov S.A., Mironov M.D. Mnogourovnevaya samorganizatsiya resursov kiberfizicheskoy sistemy: kontekstno-orientirovannyi podkhod i realizatsiya [Multi-level cyber-physical system resources self-organization: context-oriented approach and implementation]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii – Artificial Intelligence and Decision Making*, 2015, iss. 4, pp. 3–11.

* Received 02 September 2019.

Research is carried out in SPIIRAS with financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grants ## 16-29-04349 and 19-07-00670) and the Russian State Research # 0073-2019-0005.

5. Guerrero J., Oliver G., Valero O. Multi-robot coalitions formation with deadlines: complexity analysis and solutions. *Plos One*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 1–26.
6. Koes M., Nourbakhsh I., Sycara K. Heterogeneous multirobot coordination with spatial and temporal constraints. *20th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*, Boston, USA, 2005, pp. 1292–1297.
7. Yu L., Cai Z. Robot exploration mission planning based on heterogeneous interactive cultural hybrid algorithm. *5th International Conference on Natural Computation*, Tianjin, China, 2009, pp. 583–587.
8. Qian B., Cheng H.H. Bio-inspired coalition formation algorithms for multirobot systems. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 1–8.
9. Liang X., Xiao Y. Studying bio-Inspired coalition formation of robots for detecting intrusions using game theory. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 2010, vol. 40, no. 3, pp. 683–693.
10. Verma D., Desai N., Preece A., Taylor I. A block chain based architecture for asset management in coalition operations. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10190, pp. 01900Y–01900Y-9.
11. Ferrer E.C. The blockchain: a new framework for robotic swarm systems. *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2018*. Cham, Springer, 2019, vol. 2, pp. 1037–1058.
12. Shabanov V., Ivanov D. Organization of information exchange in coalitions of intelligent mobile robots. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019*, Sochi, Russia, 2019, pp. 1–5.
13. Smirnov A., Kashevnik A., Teslya N., Mikhailov S., Shabaev A. Smart-M3-based robots self-organization in pick-and-place system. *2015 17th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Yaroslavl, Russia, 2015, pp. 210–215.
14. Hartanto R., Eich M. Reliable, cloud-based communication for multi-robot systems. *2014 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*, Woburn, MA, USA, 2014, pp. 1–8.
15. Tosello E., Fan Z., Castro A.G., Pagello E. Cloud-based task planning for smart robots. *Intelligent Autonomous Systems 14*. Cham, Springer, 2017, pp. 285–300.
16. Ivanov D. Decentralized planning of intelligent mobile robot's behavior in a group with limited communications. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham, Springer, 2019, vol. 875, pp. 418–427.
17. Xue F., Tang H., Su Q., Li T. Task allocation of intelligent warehouse picking system based on multi-robot coalition. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 2019, vol. 13, no. 7, pp. 3566–3582.
18. Alkilabi M.H.M., Narayan A., Tuci E. Cooperative object transport with a swarm of e-puck robots: robustness and scalability of evolved collective strategies. *Swarm Intelligence*, 2017, vol. 11, no. 3–4, pp. 185–209.
19. Li B., Moridian B., Kamal A., Patankar S., Mahmoudian N. Multi-robot mission planning with static energy replenishment. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2019, vol. 95 (2), pp. 745–759.
20. Barbosa F.S., Duberg D., Jensfelt P., Tumova J. Guiding autonomous exploration with signal temporal logic. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, vol. 4, no. 4, pp. 3332–3339.
21. Tagliabue A., Kamel M., Siegwart R., Nieto J. Robust collaborative object transportation using multiple MAVs. *International Journal of Robotics Research*, 2019, vol. 38 (9), pp. 1020–1044.
22. Klug C., Schmalstieg D., Gloor T., Arth C. A complete workflow for automatic forward kinematics model extraction of robotic total stations using the Denavit-Hartenberg convention. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2018, vol. 95, pp. 311–329.
23. Kalyazina D.M., Kashevnik A.M. Razrabotka i otsenka ontologii sotsio-kiberfizicheskoi sistemy na osnove analiza tipovykh stsensariiev ispol'zovaniya mobil'nykh robotov [Development and evaluation of cyber-physical-social system ontology based on the analysis of typical scenarios for mobile robots interaction]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 21–36. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36.
24. Petrov M., Kashevnik A. Ontology-based indirect interaction of mobile robots for joint task solving: a scenario for obstacle overcoming. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 113, art. 02013, pp. 1–6.
25. Kashevnik A., Teslya N. Blockchain-oriented coalition formation by CPS resources: ontological approach and case study. *Electronics*, 2018, vol. 7 (5), pp. 1–16.

26. Smirnov A., Kashevnik A., Petrov M., Parfenov V. Context-based coalition creation in human-robot systems: approach and case study. *Interactive Collaborative Robotics: 2nd International Conference, ICR-2017: Proceedings*. Cham, Springer, 2017, pp. 229–238.
27. Smirnov A., Teslya N., Savosin S., Shilov N. Ontology matching for socio-cyberphysical systems: an approach based on background knowledge. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. ruSMART 2017, NsCC 2017, NEW2AN 2017*. 2017. Cham, Springer, 2017, pp. 29–39.
28. Kashevnik A., Smirnov A., Teslya N. Ontology-based interaction of mobile robots for coalition creation. *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems*, 2018, vol. 9 (2), pp. 63–78.
29. *Modelling framework Gazebo*: website. Available at: <http://gazebo-sim.org/> (accessed 12.12.2019).
30. *Framework ROS Melodic*. Available at: <http://wiki.ros.org/melodic> (accessed 12.12.2019).
31. *Packet hector_quadrotor*. Available at: http://wiki.ros.org/hector_quadrotor (accessed 12.12.2019).
32. *Packet husky_gazebo*. Available at: http://wiki.ros.org/husky_gazebo/Tutorials/Simulating%20Husky (accessed 12.12.2019).
33. Korzun D.; Kashevnik A.; Balandin S. *Novel design and the applications of smart-M3 platform in the internet of things: emerging research and opportunities*. Hershey, PA, IGI Global, 2017. 150 p. ISBN 9781522526537.

Для цитирования:

Тесля Н.Н., Чемоданов М.Н., Красильников П.Н. Коалиционная работа мобильных роботов в социокиберфизической системе на базе онтологического подхода // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 55–70. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-55-70.

For citation:

Teslya N.N., Chemodanov M.N., Krasilnikov P.N. Koalitsionnaya rabota mobil'nykh robotov v sotsio-kiberfizicheskoi sisteme na baze ontologicheskogo podkhoda [Coalition-oriented mobile robot and people operation in social cyber-physical-systems based on the ontological approach]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 55–70. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-55-70.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 519.254

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-71-84

Об оценивании функции плотности распределения случайной величины с использованием вейвлетов*

В.С. ТИМОФЕЕВ^а, Е.В. ИСАЕВА^б

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный
технический университет

^а v.timofeev@corp.nstu.ru ^б isaeva@corp.nstu.ru

Проблема оценивания плотности вероятности распределения возникает во многих областях статистического анализа данных. Существуют различные подходы к ее решению, но в последнее время становятся популярными методы, основанные на вейвлет-оценивании. Суть методов состоит в разложении неизвестной функции в ряд по некоторому конечному набору ортонормированных базисных функций. В качестве такого набора используется система функций, определенная на отрезке $[0,1]$, который не всегда совпадает с областью значений случайной величины. Поэтому для вычисления вейвлет-оценки плотности распределения случайной величины, заданной на произвольной области, требуется выполнить переход к системе функций, определенной на том же отрезке, что значения случайной величины. В рамках данной работы будут рассмотрены вейвлет-оценки плотности распределения случайной величины с помощью вейвлетов Хаара и «Мексиканская шляпа». Выполнено исследование влияния на качество вейвлет-оценок таких параметров, как объем выборки, число коэффициентов разложения функции в ряд в выражении для вейвлет-оценки плотности. В ходе работы установлено, что качество вейвлет-оценки существенно зависит от параметра сглаживания и существует ее наилучшее значение, которое, в свою очередь, меняется от выбора материнского вейвлета. Авторами предложен новый вариант оценки параметра сглаживания. Для количественной оценки степени близости функции плотности распределения и ее вейвлет-оценки была проведена проверка согласия по критерию χ^2 и сформулированы выводы о том, какой базовый вейвлет обеспечивает наиболее качественное восстановление функции плотности.

Ключевые слова: вейвлет-оценка, вейвлет-анализ, вейвлет Хаара, вейвлет «Мексиканская шляпа», функция плотности, оценка функции плотности, критерий χ^2 , параметр сглаживания, вычислительный эксперимент

* Статья получена 03 сентября 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Решение практических задач, связанных со статистическим анализом данных, как правило, предполагает наличие информации о виде распределения признаков стохастической природы. Так, проведение регрессионного анализа с использованием метода максимального правдоподобия невозможно без знания закона распределения случайной ошибки. Априорно такая информация бывает доступной крайне редко, но ее можно получать из имеющихся статистических данных [1, 2]. Одной из характеристик, содержащих полную информацию о распределении исследуемых признаков, является функция плотности. Оценка функции плотности по статистическим данным в условиях полного отсутствия информации о виде распределения может быть проведена с помощью непараметрических методов. Среди таких методов наибольшую известность получила ядерная оценка Розенблатта–Парзена [3], которая использовалась авторами при построении регрессионных зависимостей [4]. Однако ее качество сильно зависит от значения параметра сглаживания, неоптимальный выбор которого может приводить к резким флуктуациям графика восстанавливаемой функции плотности, что особенно критично на малых выборках. Это обстоятельство заставляет исследователей быть осторожными при использовании ядерных оценок.

В настоящей работе исследуется другой подход, который также следует отнести к непараметрическим. Он основан на применении теории вейвлетов, которая активно развивается в последнее время и широко используется для аппроксимации различных функций. Цель работы состоит в выявлении такого базового вейвлета, который бы обеспечивал наилучшее качество восстановления функции плотности в различных условиях, включая малые объемы выборок, и в построении универсального алгоритма оценки функции плотности.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть $\{x_j | j = \overline{1, n}\}$ представляет собой выборку независимых значений случайной величины ξ , заданных на произвольном отрезке $[c, d]$, где $\begin{cases} c = \min x_j \\ d = \max x_j \end{cases}$. Закон, а также функция плотности распределения $f(t)$ случайной величины ξ являются неизвестными. Требуется построить вейвлет-оценку $\hat{f}_n(t)$ плотности распределения $f(t)$ с использованием выборочных данных.

2. ВЕЙВЛЕТ-ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ

Согласно [5–7] вейвлет-оценка функции плотности $\hat{f}_n(t)$ случайной величины выражается разложением в ряд по некоторым ортонормированным базисным функциям $\psi_i(t)$

$$\hat{f}_n(t) = \sum_{i=1}^N \hat{c}_i \psi_i(t), \quad (1)$$

где N – число членов ряда (параметр сглаживания); \hat{c}_i – оценки коэффициентов разложения по данному базису, которые определяются по имеющимся статистическим данным

$$\hat{c}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \psi_i(x_j). \tag{2}$$

С учетом (2) вейвлет-оценку функции плотности можно записать в следующем виде

$$\hat{f}_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_N(t, x_j), \tag{3}$$

где $W_N(t, x_j) = \sum_{i=1}^N \psi_i(t) \psi_i(x_j)$.

В качестве ортонормированной системы $\psi_i(t)$, согласно [2], рассмотрим набор ортонормированных на $[0,1]$ базисных функций:

$$\psi_i(t) = 2^{k/2} \psi(2^k t - (j-1)), \tag{4}$$

где $k \geq 0$, $1 \leq j \leq 2^k$ такие, что $i = 2^k + j$, $\psi(t)$ – материнский вейвлет или вейвлет-функция. Выражение (4) справедливо для $i > 1$, в случае $i = 1$ функция $\psi_1(t) = 1$ для всех $t \in [0,1]$ и $\psi_1(t) = 0$ в противном случае. Примеры вейвлет-функций приведены в табл. 1 [8–12].

Таблица 1

Table 1

Вейвлет-функции

Wavelet functions

Вейвлет-функция	Аналитическая запись
WAVE-вейвлет (гауссов первого порядка)	$\psi(t) = -te^{-t^2/2}$
«Мексиканская шляпа» (гауссов второго порядка)	$\psi(t) = (1-t^2)e^{-t^2/2}$
Гауссов n -го порядка	$\psi(t) = (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \left(e^{-t^2/2} \right)$
DOG-вейвлет	$\psi(t) = e^{-t^2/2} - \frac{1}{2} e^{-t^2/8}$
Вейвлет Хаара	$\psi(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, 0.5) \\ -1, & t \in [0.5, 1), \\ 0, & t \notin (0, 1), \end{cases}$

Отметим, что рассмотренная выше ортонормированная система функций $\psi_i(t)$ задана на отрезке $[0,1]$, который может не совпадать с фактической областью значений ξ . Поэтому для вычисления $\hat{f}_n(t)$ требуется перейти к ортонормированной системе функций $\tilde{\psi}_i(t)$, определенной на том же отрезке $[c,d]$, что и значения случайной величины. Чтобы выполнить такой переход, воспользуемся соотношением [13, 14]

$$\tilde{\psi}_i(t) = \lambda_1 \psi_i(\lambda_2 t + \lambda_3), \quad (5)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \in R$. Согласно определению, ортонормированная система функций $\tilde{\psi}_i(t)$ должна удовлетворять двум условиям:

$$(\tilde{\psi}_i(t), \tilde{\psi}_j(t)) = \int_c^d \tilde{\psi}_i(t) \tilde{\psi}_j(t) dt = 0 \text{ для всех } i \neq j;$$

$$\|\tilde{\psi}_i(t)\| = \sqrt{(\tilde{\psi}_i(t), \tilde{\psi}_i(t))} = \sqrt{\int_c^d \tilde{\psi}_i(t) \tilde{\psi}_i(t) dt} = 1.$$

Из этих условий и с учетом (5) построим систему уравнений для нахождения коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$:

$$\begin{cases} \lambda_2 c + \lambda_3 = 0, \\ \lambda_2 d + \lambda_3 = 1, \\ \lambda_1 = \sqrt{\lambda_2}. \end{cases} \quad (6)$$

Решая систему (6), получаем

$$\lambda_1 = \frac{1}{\sqrt{d-c}}, \quad \lambda_2 = \frac{1}{d-c}, \quad \lambda_3 = \frac{-c}{d-c}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), получаем преобразование базисных функций при переходе от одной системы функций к другой:

$$\tilde{\psi}_i(t) = \frac{1}{\sqrt{d-c}} \psi_i\left(\frac{t-c}{d-c}\right). \quad (8)$$

Итоговая вейвлет-оценка функции плотности $\hat{f}_n(t)$ случайной величины на произвольном отрезке $[c,d]$ выражается разложением (3), где вместо базисных функций $\psi_i(t)$ используется система функций $\tilde{\psi}_i(t)$.

Далее в работе будет более подробно рассмотрена и исследована оценка (3), построенная на основе материнских вейвлетов Хаара и «Мексиканская шляпа».

3. ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТА ХААРА

Рассмотрим ортогональный вейвлет Хаара [15–19], определяемый соотношением из табл. 1, для которого ортонормированная система функций (4) на отрезке $[0,1]$ (система Хаара) принимает вид

$$\psi_i(t) = \begin{cases} 2^{k/2}, & t \in [2^{-k}(j-1), 2^{-(k+1)}(2j-1)], \\ -2^{k/2}, & t \in [2^{-(k+1)}(2j-1), 2^{-k}j], \\ 0, & t \notin [2^{-k}(j-1), 2^{-k}j], \end{cases} \quad (9)$$

где i, k, j такие же, как в (4).

Переход от системы функций (9) к ортонормированной системе $\tilde{\psi}_i(t)$ на произвольном отрезке $[c, d]$ с учетом (8) дает результат

$$\tilde{\psi}_i(t) = \frac{1}{\sqrt{d-c}} \begin{cases} 2^{k/2}, & t \in [2^{-k}(j-1)(d-c) + c, 2^{-(k+1)}(2j-1)(d-c) + c], \\ -2^{k/2}, & t \in [2^{-(k+1)}(2j-1)(d-c) + c, 2^{-k}j(d-c) + c], \\ 0, & t \notin [2^{-k}(j-1)(d-c) + c, 2^{-k}j(d-c) + c], \end{cases} \quad (10)$$

где i, k, j такие же, как в (4).

В результате вейвлет-оценка функции плотности $\hat{f}_n(t)$ случайной величины на произвольном отрезке $[c, d]$ с использованием материнского вейвлета Хаара выражается разложением (3) по ортонормированным базисным функциям (10).

4. ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТА «МЕКСИКАНСКАЯ ШЛЯПА»

Материнский вейвлет «Мексиканская шляпа» [18–20] определяется соотношением из табл. 1. В этом случае ортонормированная система функций (4) на отрезке $[0,1]$ принимает вид

$$\psi_i(t) = z 2^{k/2} (1 - (2^k t - (j-1))^2) e^{-(2^k t - (j-1))^2}, \quad (11)$$

где i, k, j такие же, как в (4). Множитель $z = \frac{1,031}{\sqrt{2}}$ находится из условий определения ортонормированной системы функций [18].

Переход от системы функций (11) к ортонормированной системе $\tilde{\psi}_i(t)$ на произвольном интервале $[c, d]$ с учетом (8) дает результат

$$\tilde{\psi}_i(t) = \frac{1}{\sqrt{d-c}} 2^{k/2} z (1 - \tau^2) e^{-\tau^2/2}, \quad (12)$$

где $\tau = \frac{2^k}{d-c}(t-c) - (j-1)$, а значения i, k, j такие же, как в (4).

В результате вейвлет-оценка функции плотности $\hat{f}_n(t)$ случайной величины на произвольном отрезке $[c, d]$ с использованием материнского вейвлета «Мексиканская шляпа» выражается разложением (3) по ортонормированным базисным функциям (12).

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Для сравнения качества восстановления функции плотности с использованием вейвлетов Хаара и «Мексиканская шляпа» был проведен ряд вычислительных экспериментов. Исследования проводились при разных условиях формирования выборки и различных значениях параметра сглаживания.

Прежде всего исследуем качество восстановления функции плотности стандартного нормального распределения $\hat{f}_n(t)$ от количества членов N ряда (3). Для этого смоделируем выборку объема $n=1000$, состоящую из независимых значений случайной величины ξ , распределенной по нормальному закону с параметрами $(0,1)$. Построим для данной выборки при каждом значении N , начиная с 5 и до 50, вейвлет-оценки функции плотности (3) с помощью вейвлета Хаара, а затем вейвлета «Мексиканская шляпа». Результаты восстановления $f(t)$ для $N=5, N=16, N=50$ представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Вместе с полученными оценками на рисунках представлен график истинной плотности распределения стандартного нормального закона $f(t)$.

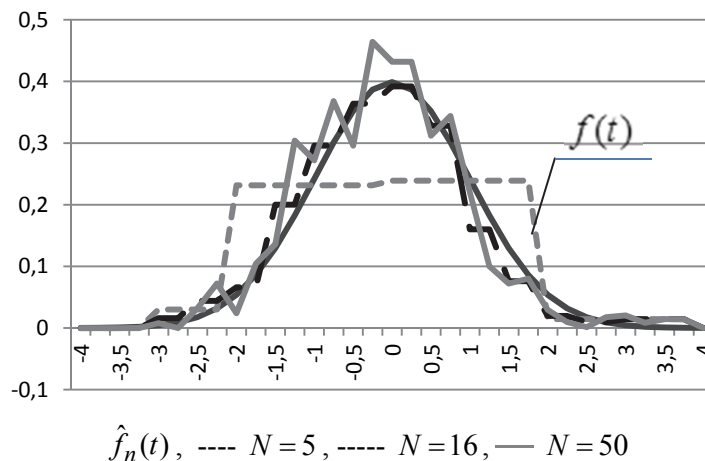


Рис. 1. Вейвлет-оценка функции плотности распределения на основе материнского вейвлета Хаара

Fig. 1. The wavelet estimate of the distribution density function based on the Haar mother wavelet

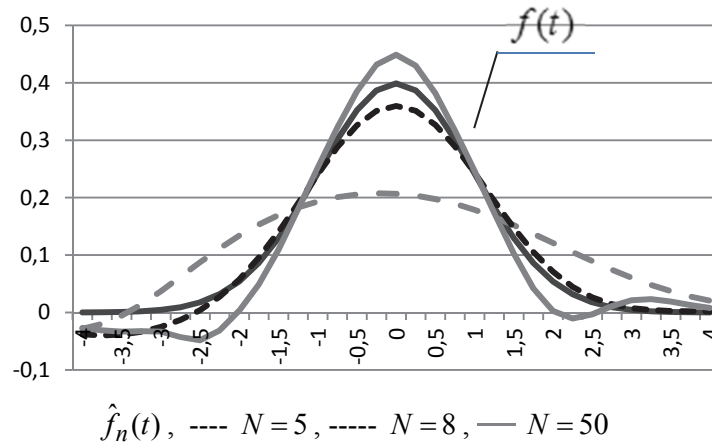


Рис. 2. Вейвлет-оценка плотности распределения на основе материнского вейвлета «Мексиканская шляпа»

Fig. 2. The wavelet estimate of the distribution density based on the Mexican Hat mother wavelet

Прежде всего отметим, что вид оценки $\hat{f}_n(t)$ существенно зависит от выбора материнского вейвлета. Так оценка, построенная с помощью вейвлета Хаара, имеет ступенчатый характер (см. рис. 1). А оценка, построенная с помощью вейвлета «Мексиканская шляпа», лишена этого недостатка (см. рис. 2).

Кроме того, из рисунков видно, что значение параметра сглаживания N также влияет на величину отклонения вейвлет-оценки от плотности распределения закона, по которому моделировалась исходная выборка. При малом значении N имеет место существенное отклонение оценки $\hat{f}_n(t)$ от истинной плотности. При достаточно большом N оценки функции плотности имеют дополнительные экстремумы, которые ухудшают ее качество. Количество таких экстремумов зависит от вида вейвлета, который используется при построении оценки (см. рис. 1 и 2). В результате оценка $\hat{f}_n(t)$ дает ложное представление о поведении истинной функции распределения $f(t)$. Результаты исследования позволили сделать вывод, что наилучшее значение параметра сглаживания для вейвлета Хаара – это $N = 16$, а для вейвлета «Мексиканская шляпа» – это $N = 8$.

Также были проведены исследования зависимости качества получаемой оценки от величины параметра сглаживания N с меньшими объемами выборки $n = 50, n = 100, n = 500$. Полученные результаты качественно совпали с приведенными выше. Отметим, что наилучшее значение N меняется при изменении вида материнского вейвлета. Анализ литературы показал, что этот факт можно учесть при оценке параметра N . Для этого доопределим набор ортонормированных базисных функций (4) для $(N + 1) \leq i \leq 2N$. Согласно [21], оценка параметра состоит в следующем:

$$N_{\min} = \arg \min_{1 < N < n} \tau_n, \tag{13}$$

$$\text{где } \tau_n = \sum_{j=N+1}^{2N} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \psi_j(x_i) \right)^2.$$

Результаты оценки параметра сглаживания с использованием соотношения (13) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

**Оценка параметра сглаживания
A smoothing parameter estimate**

n	Хаар		«Мексиканская шляпа»	
	N_{\min}	N	N_{\min}	N
100	0,00245	16	0,044	8
500	0,00045		0,004	
1000	0		0,002	

Наилучшее значение N , установленное в результате моделирования, не совпадает с предполагаемым значением, вычисленным по формуле (13). Проводя численные эксперименты, удалось установить, что наилучшее значение N должно быть не меньше значения вычисленного следующим образом:

$$N_{\min} = \arg \min_{1 < N < 25} \left[1000 \sum_{j=N+1}^{2N} \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \psi_j(t_i) \right)^2 \right], \quad (14)$$

где T – количество интервалов разбиения выборки; точка t_i – середина i -го интервала. Результаты оценки параметра сглаживания с использованием соотношения (14) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

**Оценка параметра сглаживания с учетом количества интервалов
разбиения выборки**

**A smoothing parameter estimate into account the number of sampling
intervals**

n	«Мексиканская шляпа», $N = 8$			
	N_{\min}	T	N_{\min}	T
100	7,863	34	7,635	11
500	7,863		8,62	
1000	7,863		8,654	

Для вейвлета «Мексиканская шляпа» при $T = 34$ и $T = 11$ получаем $N_{\min} = 8$. Значения N_{\min} совпадают с наилучшим значением N , полученным при моделировании.

Далее найденные наилучшие значения параметра N были использованы для исследования зависимости качества оценки функции плотности $\hat{f}_n(t)$ от объема выборки n . Для этого были смоделированы выборки независимых значений случайной величины ξ , распределенной по нормальному закону с параметрами $(0,1)$, объемом $n = 100$, $n = 500$, $n = 1000$. Для каждой из них

была построена вейвлет-оценка функции плотности (3) с помощью материнского вейвлета «Мексиканская шляпа». Результаты представлены на рис. 3. Вместе с графиками оценок на рисунке представлен график истинной плотности распределения стандартного нормального закона $f(t)$.

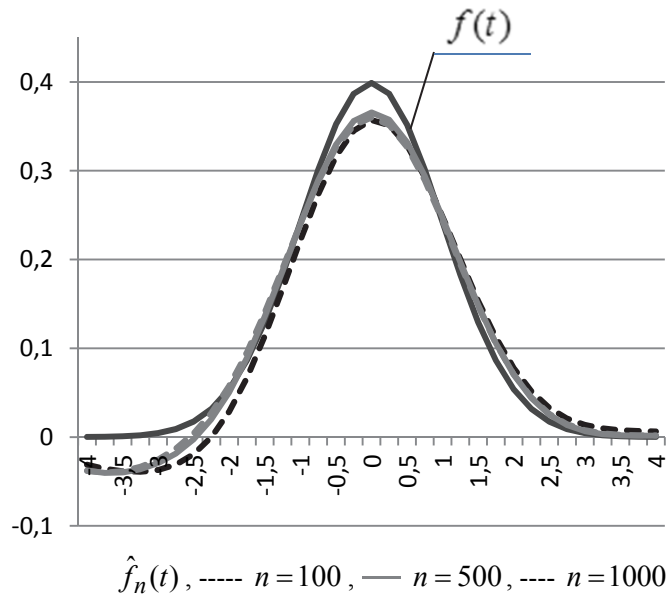


Рис. 3. Вейвлет-оценка плотности распределения на основе материнского вейвлета «Мексиканская шляпа»

Fig. 3. The wavelet estimate of the distribution density based on the Mexican Hat mother wavelet

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что объем исходной выборки мало влияет на качество вейвлет-оценки и величину отклонения от истинной функции плотности распределения, что показано на рис. 3. Подобное исследование было проведено для оценки функции плотности (3), построенной с учетом вейвлета Хаара, и установлено, что оценка $\hat{f}_n(t)$ обладает таким же качеством.

Аналогичным образом проводилось исследование выборок, смоделированных по другим законам распределения. В частности, рассматривался экспоненциальный закон с параметром $\lambda = 2$ и гамма-распределение. Полученные результаты качественно совпали с приведенными выше.

Для количественной оценки степени близости $\hat{f}_n(t)$ и $f(t)$ была проведена проверка согласия по критерию χ^2 [22–25]. Рассматривались следующие гипотезы:

$$\text{гипотеза } H_0: \hat{f}_n(t) = f(t),$$

$$\text{гипотеза } H_1: \hat{f}_n(t) \neq f(t).$$

Для имеющихся выборок объемом $n = 100$, $n = 500$, $n = 1000$, состоящих из множества независимых значений случайной величины ξ , распределенной

по нормальному закону с параметрами $(0,1)$, построим вейвлет-оценки функции плотности (3) с использованием вейвлетов Хаара и «Мексиканская шляпа» при найденных выше наилучших значениях параметра N . Вычислим значения статистики $\chi_{\text{эмп}}^2$:

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = \sum_{i=1}^T \frac{(\hat{f}_n(t_i) - f(t_i))^2}{f(t_i)}, \quad (15)$$

где T – количество интервалов разбиения выборки, полученное по формуле Стерджеса [23]; точка t_i – середина i -го интервала.

Критические значения критерия $\chi_{\text{кр}}^2$ Пирсона при числе степеней свободы $\nu = T - 1$ для $\alpha \leq 0,05$ и $\alpha \leq 0,01$ и результаты расчета согласия приведены в табл. 4 [23], из которой видно, что значения величины $\chi_{\text{эмп}}^2$ попали в зону незначимости, причем они намного меньше $\chi_{\text{кр}}^2$ для 5 %-го уровня значимости. Следовательно, гипотеза H_0 не отвергается. Вейвлет-оценка $\hat{f}_n(t)$ и теоретическая функция плотности $f(t)$ очень близки.

Таблица 4

Table 4

Значение статистики χ^2
The chi-square statistic value

n	T	$\chi_{\text{кр}}^2$		$\chi_{\text{эмп}}^2$ (Хаар)	$\chi_{\text{эмп}}^2$ («Мексиканская шляпа»)
		$\alpha \leq 0,05$	$\alpha \leq 0,01$		
100	8	14,067	18,475	3,192	12,243
500	10	16,919	21,666	2,986	11,923
1000	11	18,307	23,209	2,592	11,746

Проверка согласия по критерию χ^2 выполнялась для 1000 выборок объемом $n = 100$, $n = 500$, $n = 1000$. Во всех случаях результат совпал с приведенным в табл. 4. Так же проверялось согласие для случайных величин, распределенных по экспоненциальному закону с параметром $\lambda = 2$ и по гамма-распределению. Значения величины $\chi_{\text{эмп}}^2$ всегда оказывались меньше критической величины для 5 %-го уровня значимости, что позволило сделать вывод: вейвлет-оценка $\hat{f}_n(t)$ и теоретическая функция плотности $f(t)$ очень близки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены оценки функции плотности распределения случайной величины на основе вейвлетов Хаара и «Мексиканская шляпа». Установлено, что объем исходной выборки мало влияет на качество вейвлет-оценки, а вот выбор материнского вейвлета, наоборот, очень важен. От выбора материнского вейвлета зависит значение параметра сглаживания, который, в свою очередь, существенно влияет на качество оценки функции плотности распределения случайной величины. В ходе вычислительных экспериментов удалось установить, что наилучшее значение параметра N для вейвлета Хаара равно 16, а для вейвлета «Мексиканская шляпа» – равно 8. Эти значения не совпадают со значениями, найденными с помощью существующих методов оценивания. В работе предложен новый способ оценивания, который позволяет получать значения параметра, близкие к тем, что получены в результате экспериментов. Показан ряд преимуществ каждой из построенных оценок. Выполнена поверка согласия по критерию χ^2 количественной оценки степени близости $\hat{f}_n(t)$ и $f(t)$, в результате чего была подтверждена эффективность рассмотренных вариантов оценивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев В.С., Хайленко Е.А. Адаптивное оценивание параметров регрессионных моделей с использованием обобщенного лямбда-распределения // Доклады Академии наук высшей школы РФ. – 2010. – № 2 (15). – С. 25–36.
2. Тимофеев В.С., Хайленко Е.А. Робастные оценки моментов при идентификации лямбда-распределения в рамках адаптивного оценивания // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2017. – № 4 (37). – С. 101–111.
3. Fan J., Gijbels I. Local polynomial modelling and its application. – London: CRC Press, 1996. – 360 p.
4. Тимофеев В.С. Ядерные оценки плотности при идентификации уравнений регрессии. // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 3 (40). – С. 41–50.
5. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: РХД, 2001. – 464 с.
6. Wavelets on irregular point sets / I. Daubechies, I. Guskov, P. Schroder, W. Sweldens // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1999. – Vol. 357. – P. 2397–2413.
7. Silverman B. Density estimation for statistics and data analysis. – London: Chapman and Hall, 1986. – 176 p.
8. Смоленцев Н.К. Введение в теорию вейвлетов. – М.; Ижевск: РХД, 2010. – 282 с.
9. Захарова Т.В., Шестаков О.В. Теория вейвлетов и ее применение в обработке сигналов: учебное пособие / Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Факультет вычислительной математики и кибернетики, Кафедра математической статистики. – М.: МастерПринт, 2018. – 178 с.
10. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. – 58 с.
11. Малашкевич И.А. Вейвлет-анализ сигналов: от теории к практике: учебное пособие / Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – 276 с.
12. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории / пер. с нем. Т.Э. Кренкеля; под ред. А.Г. Кюркчана. – М.: Техносфера, 2004. – 273 с.
13. Шестаков О.В. Вероятностно-статистические методы анализа и обработки сигналов на основе вейвлет-алгоритмов. – М.: Аргамак-Медиа, 2016. – 200 с.
14. Фрейзер М. Введение в вэйвлеты в свете линейной алгебры / пер. с англ. Я.М. Жилейкина. – Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 487 с.

15. Lepik Ü. Numerical solution of evolution equations by the Haar wavelet method // Applied Mathematics and Computation. – 2007. – Vol. 185 (1). – P. 695–704.
16. Lepik Ü., Hein H. Haar wavelets: with applications. – Cham: Springer, 2014. – 207 p. – (Mathematical engineering).
17. Stankovic R., Falkowski B. The Haar wavelet transform: its status and achievements // Computers and Electrical Engineering. – 2003. – Vol. 29 (1). – P. 25–44.
18. Вейвлет-анализ в примерах: учебное пособие / О.В. Нагорнов, В.Г. Никитаев, В.М. Простокишин, С.А. Тюфлин, А.Н. Проничев, Т.И. Бухарова, К.С. Чистов, Р.З. Кашафутдинов, В.А. Хоркин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 120 с.
19. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. – New York, NY: Academic Press, 1999. – 851 p.
20. Чернов А.В. О применении квадратичных экспонент для дискретизации задач оптимального управления // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2017. – Т. 27, вып. 4. – С. 558–575.
21. Антонов А.В. Системный анализ: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.
22. Геворкян П.С., Потемкин А.В., Эйсымонт И.М. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Физматлит, 2016. – 176 с.
23. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для прикладного бакалавриата. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 479 с.
24. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика. – М.: Либроком, 2019. – 352 с.
25. Максимов Ю.Д. Математическая статистика: опорный конспект. – М.: Проспект, 2016. – 104 с.

Тимофеев Владимир Семенович, доктор технических наук, декан факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного технического университета. Имеет более 70 публикаций. E-mail: v.timofeev@corp.nstu.ru.

Исаева Елена Валерьевна, старший преподаватель кафедры высшей математики Новосибирского государственного технического университета. Имеет более 20 публикаций. E-mail: isaeva@corp.nstu.ru.

Timofeev Vladimir Semenovich, D.Sc. (Eng.), dean at the applied mathematics and computer science department of Novosibirsk State Technical University. He is the author of more than 70 publications. E-mail: v.timofeev@corp.nstu.ru.

Isaeva Elena Valerievna, senior lecturer higher mathematics department of Novosibirsk State Technical University. He is the author of more than 20 publications. E-mail: isaeva@corp.nstu.ru.

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-71-84

On the estimation of the distribution density function of a random variable using wavelets^{*}

V.S. TIMOFEEV^a, E.V. ISAEVA^b

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a v.timofeev@corp.nstu.ru ^b isaeva@corp.nstu.ru

Abstract

The problem of estimating the probability density of distribution arises in many statistical data analysis. There are different approaches to solving it, but recently methods based on wavelet assessment have become popular. The essence of the methods is to decompose an unknown

^{*} Received 03 September 2019.

function into a series over some finite set of orthonormal basis functions. A system of functions defined on the $[0, 1]$ line which does not always coincide with the range of values of a random quantity is used as such a set. Therefore, in order to calculate a wavelet estimate of the distribution density of a random quantity given in an arbitrary region, it is necessary to perform a transition to a system of functions defined on the same segment as the random quantity values. Within the framework of this work, the wavelet estimates of the distribution density of a random value will be considered with the help of the Haar and Mexican Hat wavelets. The study of the effect on the quality of wavelet estimates of such parameters as the sample size, the number of coefficients of expansion of a function in a series in the expression for wavelet density estimation was performed. In the course of the work, it has been found that the quality of the wavelet estimation depends significantly on the smoothing parameter and that its best value exists, which in turn depends on the choice of the mother wavelet. The authors propose a new version of smoothing parameter estimation. In order to quantify the degree of proximity of the distribution density function and its wavelets estimation, agreement on the chi-square criterion was tested and conclusions were made as to which basic wavelet provides the highest quality recovery of the density function.

Keywords: wavelet estimate, wavelet-analysis, Haar wavelet, Mexican Hat wavelet, function of density, estimation of density wavelet function, chi-square criterion, smoothing parameter, computing experiment

REFERENCES

1. Timofeev V.S., Khailenko E.A. Adaptivnoe otsenivanie parametrov regressionnykh modelei s ispol'zovaniem obobshchennogo lyambda-raspredeleniya [Adaptive estimation of regression models parameters using generalized lambda-distribution]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2010, no. 2 (15), pp. 25–36.
2. Timofeev V.S., Khailenko E.A. Robastnye otsenki momentov pri identifikatsii lyambda-raspredeleniya v ramkakh adaptivnogo otsenivaniya [Robust estimates of moments in the identification of generalized lambda-distribution within the adaptive regression model estimation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 4 (37), pp. 101–111.
3. Fan J., Gijbels I. *Local polynomial modelling and its application*. London, CRC Press, 1996. 360 p.
4. Timofeev V.S. Yadernye otsenki plotnosti pri identifikatsii uravnenii regressii [The Kernel estimation of density function in the regression identification problem]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 3 (40), pp. 41–50.
5. Daubechies I. *Desyat' lektii po veivletam* [Ten lectures on weevletam]. Izhevsk, Regular and Chaotic Dynamics Publ., 2001. 464 p. (In Russian).
6. Daubechies I., Guskov I., Schroder P., Sweldens W. Wavelets on irregular point sets. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1999, vol. 357, pp. 2397–2413.
7. Silverman B. *Density estimation for statistics and data analysis*. London, Chapman and Hall, 1986. 176 p.
8. Smolentsev N.K. *Vvedenie v teoriyu veivletov* [Introduction to the theory of weevlets]. Moscow, Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2010. 282 p.
9. Zakharova T.V., Shestakov O.V. *Teoriya veivletov i ee primeneniye v obrabotke signalov* [The theory of weevlets and its application in signal processing]. Moscow, MasterPrint Publ., 2018. 178 p.
10. Vityazev V.V. *Veivlet-analiz vremennykh ryadov* [Wevlet-analysis of time series]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2001. 58 p.
11. Malashkevich I.A. *Veivlet-analiz signalov: ot teorii k praktike* [Weivlet-analysis of signals: from theory to practice]. Yoshkar-Ola, Volga state technological university Publ., 2016. 276 p.
12. Blatter C. *Veivlet-analiz. Osnovy teorii* [Wavlet analysis. Foundations of theory]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 273 p. (In Russian).

13. Shestakov O.V. *Veroyatnostno-statisticheskie metody analiza i obrabotki signalov na osnove veivlet-algoritmov* [Probabilistic-statistical methods of analysis and processing of signals on the basis of weevet-algorithm]. Moscow, Argamak-Media Publ., 2016. 200 p.
14. Frasier M. *An introduction to wavelets through linear algebra*. New York, Springer, 1999 (Russ. ed.: Freizer M. *Vvedenie v veivlety v svete lineinoi algebrы*. Moscow, Binom Publ., 2007. 487 p.).
15. Lepik Ü. Numerical solution of evolution equations by the Haar wavelet method. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, vol. 185 (1), pp. 695–704.
16. Lepik Ü., Hein H. *Haar wavelets: with applications*. Cham: Springer, 2014. 207 p.
17. Stankovic R., Falkowski B. The Haar wavelet transform: its status and achievements. *Computers and Electrical Engineering*, 2003, vol. 29 (1), pp. 25–44.
18. Nagornov O.V., Nikitaev V.G., Prostokishin V.M., Tyuflin S.A., Pronichev A.N., Bukharova T.I., Chistov K.S., Kashafutdinov R.Z., Khorkin V.A. *Veivlet-analiz v primerakh* [Weevlet analysis in examples]. Moscow, National Research Nuclear University MEPhI Publ., 2010. 120 p.
19. Mallat S. *A wavelet tour of signal processing*. New York, NY, Academic Press, 1999. 851 p.
20. Chernov A.V. O primeneniі kvadraticnykh eksponent dlya diskretizatsii zadach optimal'nogo upravleniya [On the application of Gaussian functions for discretization of optimal control problems]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika Mekhanika. Komp'yuternye nauki – The Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, 2017, vol. 27, iss. 4, pp. 558–575.
21. Antonov A.V. *Sistemnyi analiz* [System analysis]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 454 p.
22. Gevorkyan P.S., Potemkin A.V., Eismont I.M. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2016. 176 c.
23. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Lubertsy, Yurait Publ., 2016. 479 p.
24. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow, Librokom Publ., 2019. 352 p.
25. Maksimov Yu.D. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow, Prospekt Publ., 2016. 104 p.

Для цитирования:

Тимофеев В.С., Исаева Е.В. Об оценивании функции плотности распределения случайной величины с использованием вейвлетов // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 71–84. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-71-84.

For citation:

Timofeev V.S., Isaeva E.V. Ob otsenivanii funktsii plotnosti raspredeleniya sluchainoi velichiny s ispol'zovaniem veivletov [On the estimation of the distribution density function of a random variable using wavelets]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 71–84. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-71-84.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 519.254

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-85-98

Автоматический подбор опережающих индикаторов для прогнозирования состояния регионального рынка труда*

А.Ю. ТИМОФЕЕВА

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

a.timofeeva@corp.nstu.ru

При построении прогнозных моделей на основе опережающих индикаторов возникает проблема отбора наиболее информативных переменных из множества всех потенциальных предикторов. Эта проблема может быть решена встроенными методами, такими как регрессия LASSO, или методами фильтрации, например, с помощью подхода на основе корреляций. В работе ставится задача сравнения эффективности этих методов с альтернативными подходами к анализу временных рядов (модель ARIMA, Хольта–Уинтерса, экспоненциального сглаживания). Для этого предложен алгоритм построения прогнозных моделей, включающий автоматический подбор опережающих индикаторов. Для проведения эмпирического исследования из официальных статистических данных отобраны показатели, пригодные для прогнозирования состояния регионального рынка труда. Они описывают такие индикаторы, как денежная масса, структура баланса кредитных организаций и индекс цен. Производилось псевдовневыборочное прогнозирование ряда показателей, характеризующих ситуацию на регистрируемом рынке труда Новосибирской области за период с 2015 по 2018 г. Использовались прямые многошаговые прогнозы на 6 месяцев вперед. Оказалось, что устойчивая модификация percentile-lasso не дает никаких преимуществ с точки зрения средних абсолютных прогнозных ошибок. В большинстве случаев лучшие результаты получены с помощью регрессии LASSO с выбором параметра регуляризации по правилу одной стандартной ошибки на основе 10-блочной кросс-валидации со случайным формированием блоков. За счет автоматического подбора опережающих индикаторов удалось уменьшить ошибки прогнозирования по сравнению с альтернативными методами. Тем самым предложенный алгоритм признан пригодным к использованию для прогнозирования состояния регионального рынка труда.

Ключевые слова: отбор предикторов, регрессия LASSO, percentile-lasso, отбор признаков на основе корреляций, опережающие индикаторы, рынок труда, прогнозирование, ARIMA, модель Хольта–Уинтерса, алгоритм STL

* Статья получена 22 сентября 2019 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ/РГНФ, грант № 17-32-01087 а2.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При построении прогнозных моделей на основе опережающих индикаторов количество потенциальных предикторов, как правило, велико. С учетом возможного числа лагов переменных это порождает задачу высокой размерности [1].

Для снижения размерности задачи применяются два принципиально разных подхода. Первый предполагает выделение признаков на основе метода главных компонент [1]. Это позволяет оставить в качестве входных данных только небольшое количество ортогональных переменных. Однако кросс-корреляция регрессоров в больших наборах данных может привести к неточным прогнозам, и, следовательно, меньший набор скорее всего обеспечивает меньшую среднюю ошибку прогноза. Так, в работе [2] обнаружено, что включение большего числа предикторов для оценки главных компонент делает их менее полезными для прогнозирования. Тем самым извлечение признаков для построения прогнозных моделей на основе опережающих индикаторов нежелательно.

Второй подход заключается в отборе наиболее информативных предикторов. Чаще всего отбор предикторов осуществляется совместно с построением прогнозных моделей с привлечением встроенных методов, таких как регрессия LASSO [3]. За счет регуляризации некоторые коэффициенты регрессии обнуляются. Тем самым получается разреженное решение, включающее только существенные признаки. LASSO успешно применяется для тактического прогнозирования продаж с использованием макроэкономических опережающих индикаторов [4]. При прогнозировании макроэкономических показателей LASSO было сочтено полезным для выбора релевантных предикторов [5]. В исследовании [6] с помощью многоступенчатой регрессии LASSO решается проблема сверхвысокой размерности пространства маркетинговых переменных, влияющих на продажи розничного магазина на уровне единиц товарной номенклатуры. Модель LASSO становится все более привлекательной в свете проблем с большими данными [3].

Однако результаты отбора опережающих индикаторов на основе встроенных методов сильно зависят от типа прогнозной модели. В отличие от этого методы фильтрации дают более общий результат, свободный от модельных предположений. Одним из таких многомерных методов является подход на основе корреляций (CFS) [7]. Он обеспечивает компромисс между релевантностью признаков с точки зрения их влияния на отклик и их избыточностью в смысле взаимной корреляции. Этот подход предложен для решения задач классификации. Его применимость к отбору признаков в условиях их сильной корреляции, в частности при подборе опережающих индикаторов, показана в работе [8].

Здесь ставится задача сравнения эффективности встроенных методов (регрессии LASSO) и методов фильтрации (отбор на основе корреляций CFS) по сравнению с альтернативными подходами к прогнозированию состояния регионального рынка труда. Для этого предложен алгоритм построения прогнозных моделей на основе автоматического отбора опережающих индикаторов.

1. РЕГРЕССИЯ LASSO

В условиях переизбытка входных данных оценки регрессии, полученные методом наименьших квадратов (МНК), часто оказываются нестабильными. Во избежание этого используется метод регуляризации, который заключается в наложении дополнительных ограничений на переменные для предотвращения излишней сложности модели. Смыслом процедуры является сжатие вектора коэффициентов регрессии β при ее подгонке так, чтобы в среднем эти коэффициенты оказались по абсолютной величине несколько меньше, чем это было бы при оптимизации по МНК.

LASSO минимизирует сумму квадратов ошибок, накладывая ограничение на сумму абсолютных значений параметров модели. Оценка определяется решением задачи оптимизации:

$$\hat{\beta} = \arg \min \left[\sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \|\beta\| \right], \quad (1)$$

где y_i , x_{ij} – i -е наблюдаемое значение отклика j -го фактора; $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_m)$ – вектор параметров; n – объем выборки; m – число факторов; λ – параметр регуляризации, который контролирует величину штрафа за сложность.

При этом достигается некоторый компромисс между ошибкой регрессии и размерностью используемого признакового пространства, выраженного суммой абсолютных значений коэффициентов $\|\beta\|$. В ходе минимизации (1) некоторые коэффициенты сокращаются до нуля. Таким образом, интерпретируемость модели увеличивается путем удаления нерелевантных переменных, которые не связаны с откликом.

Результаты оценивания чувствительны к выбору параметра регуляризации. Для его выбора широко используются два подхода. Значение, которое дает минимальную среднюю ошибку при перекрестной проверке, обозначается через $\lambda = \min$. Правило одного стандартного отклонения ($\lambda = 1se$) является альтернативным способом выбора значения параметра регуляризации. Идея состоит в том, чтобы взять простейшую (наиболее разреженную) модель, ошибка которой находится в пределах одного стандартного отклонения от минимальной ошибки [3].

Процедура перекрестной проверки (кросс-валидации) предполагает обучение и тестирование модели на разных наборах данных. Это позволяет ослабить эффект переобучения. Поскольку в случае с временными рядами макроэкономических показателей, которые довольно короткие, получение дополнительных данных затруднительно или невозможно, то имеющийся объем данных разбивается на части для оценивания и контроля ошибки. В зависимости от того, каким образом происходит это разбиение, можно выделить несколько наиболее распространенных процедур: кросс-валидация по K блокам, валидация последовательным случайным сэмплированием, поэлементная кросс-валидация (LOOCV).

Комбинация LASSO и перекрестной проверки со случайным разбиением оказывается нестабильной в том смысле, что повторное применение процедуры часто дает разные результаты [9]. Более того, устойчивость регуляриза-

ции зависит от свойств набора данных. Поэтому необходимо быть осторожным при использовании LASSO как метода построения прогнозной модели.

В работе [10] показано, что модель, выбранная с помощью LASSO, может быть чрезвычайно чувствительной к выбору блоков, используемых для перекрестной проверки. Следствием этой чувствительности является то, что результаты анализа могут лишиться интерпретируемости. Чтобы преодолеть такую нестабильность отбора модели с помощью LASSO, в [10] предлагается метод, называемый percentile-lasso. Модель, получаемая с помощью percentile-lasso, соответствует LASSO регрессии, оцененной с использованием соответствующего перцентиля возможных «оптимальных» значений параметра регуляризации. Показано, что percentile-lasso может значительно улучшить как стабильность выбора модели, так и ошибку выбора модели по сравнению с LASSO. Важно отметить, что при применении к реальным данным percentile-lasso, в отличие от LASSO, дает интерпретируемые результаты, то есть результаты, которые являются робастными к выбору блоков наблюдений для перекрестной проверки.

2. ОТБОР НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИЙ

Метод CFS (Correlation-based Feature Selection) предложен в работе [7]. Признаки выбираются так, чтобы обеспечить наибольшую корреляцию с откликом и наименьшую взаимосвязь между самими признаками. Тем самым решается следующая оптимизационная задача:

$$\frac{\sum_{i \in S_k} R_i}{\sqrt{k+2 \sum_{i, j \in S_k, i \neq j} r_{ij}}} \rightarrow \max_{S_k}, \quad (2)$$

где R_i – абсолютное значение коэффициента корреляции между i -м признаком и откликом; r_{ij} – абсолютное значение коэффициента корреляции между i -м и j -м признаком; S_k – подмножество из k признаков. При анализе временных рядов экономических показателей чаще всего как отклик, так и предикторы измеряются в количественных шкалах, поэтому допустимо использование обычного коэффициента корреляции Пирсона.

Представим задачу (2) как задачу нелинейного целочисленного программирования:

$$\frac{\sum_{i=1}^m R_i^2 x_i + 2 \sum_{i \neq j} R_i R_j x_i x_j}{\sum_{i=1}^m x_i + 2 \sum_{i \neq j} r_{ij} x_i x_j} \rightarrow \max_{x_1, \dots, x_m}, \quad (3)$$

где $x_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, \dots, m$. Если $x_i = 1$, то i -й признак входит в оптимальный набор, иначе $x_i = 0$. Задача (3) является дробно-полиномиальной задачей целочисленного программирования. Поиск глобального оптимума путем перебора всех комбинаций приводит к NP-полной задаче. На практике получили

распространение процедуры пошагового отбора переменных, которые позволяют снизить количество вычислений, но не обеспечивают достижения оптимального набора входных переменных ввиду «жадных» стратегий. Такие алгоритмы считаются эвристическими, поскольку не являются гарантированно точными или оптимальными, но достаточны для решения поставленной задачи. Далее используется эвристический алгоритм прямого поиска.

3. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ

Особенностью анализа временных рядов является присутствие случайных составляющих (тренда, сезонности, цикличности). Предлагается вычислять значения показателей в процентах к соответствующему месяцу предыдущего года. Такое преобразование позволяет сразу исключить нелинейный долгосрочный тренд (при его наличии) и сезонность, а также обнаружить во временном ряду изменения, вызванные циклическими колебаниями, связанными с кризисом. Однако при этом из исходных данных теряется целый год, что может быть существенно при ограниченном размере временного ряда.

Такая проблема возникла с показателями регионального рынка труда. Из-за ограниченного объема исходных данных их предварительная обработка включала только исключение сезонной компоненты. Для этого предлагается использовать один из способов разделения временного ряда на компоненты тренда, сезонности и остатки – алгоритм STL с использованием Loess [11].

При осуществлении прогнозирования на основе регрессионных моделей предполагается использовать не итеративные, а прямые многошаговые прогнозы. Для построения таких прогнозов в модели с распределенными лагами все переменные лагируются на h периодов для получения прогноза на h шагов вперед. Горизонт прогнозирования h фиксирован. Это позволяет использовать коэффициенты регрессии непосредственно для вычисления прогноза без итераций.

Тогда алгоритм построения прогнозной модели и вычисления прогнозов на основе опережающих индикаторов можно представить в следующем виде.

Шаг 1. Декомпозиция временного ряда показателя регионального рынка труда y_t с помощью алгоритма STL:

$$y_t = \tilde{y}_t + S_t,$$

где S_t – сезонная компонента; \tilde{y}_t – временной ряд за исключением сезонной компоненты (тренд, сглаженный с помощью Loess, и остатки).

Шаг 2. Построение прогнозной модели на основе опережающих индикаторов:

$$\tilde{y}_t = \alpha + \sum_{k=1}^K \beta_k x_{t-h}^{(k)} + \varepsilon, \quad (4)$$

где α , β_k – параметры, подлежащие оцениванию; h – глубина запаздывания; $x_{t-h}^{(k)}$ – k -й экономический показатель, рассматриваемый как опережающий

индикатор, представленный в процентах к соответствующему месяцу предыдущего года, взятый с лагом h ; ε – случайная ошибка.

Шаг 3. Построение прогноза на h периодов вперед:

$$\hat{y}_{T+h} = \hat{\alpha} + \sum_{k=1}^K \hat{\beta}_k x_T^{(k)},$$

где $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}_k$ – оценки параметров; T – длина временного ряда.

Шаг 4. Добавление оценки сезонности \hat{S}_t и получение итогового прогноза:

$$\hat{y}_{T+h} = \hat{y}_{T+h} + \hat{S}_t.$$

На шаге 2 используются описанные выше методы автоматического отбора предикторов. При использовании регрессии LASSO в модель (4) включаются все возможные индикаторы. При использовании метода CFS модель (4) строится только по отобранному подмножеству признаков.

Для оценки качества прогнозов, построенных с помощью опережающих индикаторов, имеет смысл сравнить эти результаты с альтернативными вариантами прогнозирования, основанными только на динамике самих показателей рынка труда. В качестве альтернативных подходов для полученных временных рядов показателей регионального рынка труда с исключенной сезонностью строились модели ARIMA, экспоненциального сглаживания (ES) и Хольта–Уинтерса [12].

Предложенный алгоритм реализован в статистической среде RStudio [13]. Алгоритм STL реализован через функцию `stl` в стандартном пакете `stats`. Для автоматического подбора структуры ARIMA-модели использовалась функция `auto.arima{forecast}`. Оптимальные значения параметров модели Хольта–Уинтерса найдены путем минимизации квадрата ошибки предсказания на один шаг вперед с помощью функции `HoltWinters{stats}`. С помощью функции `forecast` из одноименного пакета осуществлялось прогнозирование на h шагов вперед как по модели, оцененной по методологии ARIMA, так и по модели Хольта–Уинтерса. Далее эта возможность использовалась для сопоставления результатов прогнозирования с помощью опережающих индикаторов с альтернативными методами.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭМПИРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статистическая информация о ситуации на регистрируемом рынке труда взята с сайта Федеральной службы по труду и занятости [14]. Выбраны следующие прогнозируемые переменные:

- y_1 – численность безработных граждан (в тыс. чел.);
- y_2 – заявленная работодателями потребность в работниках;
- y_3 – уровень регистрируемой безработицы;
- y_4 – коэффициент напряженности на рынке труда.

Из базы данных ЕМИСС [15] выбраны показатели, которые можно отнести к опережающим индикаторам. Одним из критериев выбора было наличие данных с ежемесячной динамикой. В результате выделены три основных индикатора: денежная масса, структура баланса кредитных организаций и индекс цен.

Показатели общенационального масштаба для индикатора «Денежная масса»:

- денежный агрегат М2;
- денежный агрегат М1;
- денежный агрегат М0;
- переводные депозиты населения;
- переводные депозиты нефинансовых и финансовых (кроме кредитных)

организаций.

Показатели общенационального масштаба для индикатора «Структура баланса кредитных организаций»:

- чистые иностранные активы;
- требования к нерезидентам;
- обязательства перед нерезидентами;
- требования к органам государственного управления субъектов РФ и органам местного самоуправления;
- требования к другим финансовым организациям;
- обязательства перед Центральным банком;
- депозиты, включаемые в широкую денежную массу;
- депозиты, не включаемые в широкую денежную массу.

Показатели регионального масштаба для индикатора «Индекс цен»:

- базовый индекс потребительских цен на товары и услуги;
- индексы цен приобретения машин и оборудования инвестиционного назначения (по отраслям).

При использовании региональных показателей в качестве региона взята Новосибирская область (НСО), поскольку основной целью выступало прогнозирование показателей рынка труда НСО.

Всем перечисленным показателям соответствует по одной переменной, кроме индексов цен приобретения машин и оборудования инвестиционного назначения. Доступны данные по 92 видам экономической деятельности, в том числе по 16 разделам ОКВЭД, и суммарный индекс по всем видам деятельности.

Для оценки качества моделей, построенных разными методами, осуществлялось псевдовневыборочное прогнозирование. Для этого исходный временной ряд разделялся на обучающий набор, по которому строились модели, и тестовый набор, для которого осуществлялось прогнозирование. Исходный временной ряд насчитывал 78 месяцев (с января 2012 г. по июнь 2018 г.).

Для того чтобы снизить случайность полученных результатов, псевдовневыборочное прогнозирование производилось многократно. С этой целью обучающий набор постоянно расширялся на одну точку данных. Первоначальный обучающий набор включал данные за 37 месяцев: с января 2012 г. по январь 2015 г. включительно. Следующий набор включал уже 38 точек: с января 2012 г. по февраль 2015 г. включительно. И так далее вплоть до декабря 2017 г. Таким образом, получилось всего 36 наборов.

Горизонт прогнозирования выбран равным шести месяцам, $h = 6$. Следовательно, из тестового набора использовалось одно наблюдение, соответствующее шести месяцам вперед. Для первого набора это был июль 2015 г., а для последнего набора – июнь 2018 г. (последняя точка данных).

Далее представлены результаты псевдовневыборочного прогнозирования в виде средних абсолютных прогнозных ошибок (MAE) для каждого года с 2015 по 2018 г.:

$$MAE_j = \frac{1}{n(T_j)} \sum_{T_j} \left| \hat{y}_{T_j+h|T_j} - y_{T_j+h} \right|, \quad j = 2012, \dots, 2018,$$

где $\hat{y}_{T_j+h|T_j}$ – прогноз для периода $T_j + h$ по модели, построенной по данным, доступным до момента T_j включительно, $T_{2015} = 37, \dots, 42$, $T_j = 43 + 12(j - 2016), \dots, 54 + 12(j - 2016)$, $j = 2016, 2017$, $T_{2018} = 67, \dots, 72$; $n(T_j)$ – число месяцев в j -м году, для которых строился прогноз.

Исходный набор потенциальных опережающих индикаторов состоял из 55 переменных, поскольку после очистки данных индексы цен приобретения машин и оборудования инвестиционного назначения остались только по 40 видам экономической деятельности (в том числе по разделам ОКВЭД) и суммарный индекс по всем видам деятельности.

Для отбора существенных предикторов сначала использовалась регрессия LASSO. Как отмечалось выше, результаты оценивания модели (4) путем решения задачи (1) чувствительны к выбору параметра регуляризации. Произведено сравнение двух вариантов выбора параметра – на основе минимума кросс-валидации и по правилу одной стандартной ошибки. Процедура перекрестной проверки реализовывалась двумя альтернативными способами: LOOCV (поэлементная) и 10-блочная со случайным формированием блоков. Следовательно, рассматривалось четыре варианта: минимум поэлементной кросс-валидации ($LOOCV \lambda = \min$), одна стандартная ошибка поэлементной кросс-валидации ($LOOCV \lambda = 1se$), минимум 10-блочной кросс-валидации ($10\text{-foldCV} \lambda = \min$), одна стандартная ошибка 10-блочной кросс-валидации ($10\text{-foldCV} \lambda = 1se$).

В табл. 1 сравниваются средние абсолютные ошибки прогнозирования при разных вариантах оценивания регрессии LASSO для четырех анализируемых показателей рынка труда. В целом результаты не сильно отличаются. Однако для всех показателей наиболее существенные различия наблюдались в 2015 г. Для численности безработных и уровня безработицы лучше работает правило одной стандартной ошибки и LOOCV, для потребности в работниках и коэффициента напряженности на рынке труда – минимум кросс-валидации. Если обобщать результаты, то для большинства показателей почти за весь период наименьшие ошибки давала 10-блочная кросс-валидация и выбор параметра регуляризации по правилу одной стандартной ошибки.

Однако 10-блочная кросс-валидация со случайным формированием блоков дает случайные результаты, следовательно, нестабильна. Для получения более устойчивых прогнозов использован новый подход percentile-lasso.

В работе [10] предлагается задавать уровень квантиля для оптимального параметра регуляризации в диапазоне от 0,75 до 1. Оказалось, что выбор квантиля существенно не сказывается на результатах прогнозирования состояния рынка труда. Явные расхождения наблюдаются только в 2015 г. Причем для численности безработных лучший результат обеспечивает выбор квантиля уровня 0,95. Для других показателей, наоборот, наименьшее значение квантиля предпочтительнее.

Таблица 1

Table 1

MAE при разных процедурах кросс-валидации для LASSO**MAE under various cross-validation procedures for LASSO**

Отклик	Процедура CV	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
y_1	10-foldCV $\lambda = \min$	2,134	0,763	0,967	1,794
	10-foldCV $\lambda = 1se$	1,328	0,660	0,926	1,563
	LOOCV $\lambda = \min$	2,059	0,771	0,983	1,889
	LOOCV $\lambda = 1se$	1,245	0,666	0,937	1,668
y_2	10-foldCV $\lambda = \min$	3887	2641	2089	2436
	10-foldCV $\lambda = 1se$	6546	2168	1960	2119
	LOOCV $\lambda = \min$	4060	2653	402	2414
	LOOCV $\lambda = 1se$	7384	2214	2096	2173
y_3	10-foldCV $\lambda = \min$	0,199	0,051	0,070	0,074
	10-foldCV $\lambda = 1se$	0,132	0,054	0,069	0,087
	LOOCV $\lambda = \min$	0,190	0,050	0,068	0,079
	LOOCV $\lambda = 1se$	0,129	0,055	0,068	0,083
y_4	10-foldCV $\lambda = \min$	0,216	0,113	0,064	0,053
	10-foldCV $\lambda = 1se$	0,242	0,065	0,054	0,049
	LOOCV $\lambda = \min$	0,147	0,114	0,085	0,053
	LOOCV $\lambda = 1se$	0,267	0,071	0,066	0,051

В табл. 2 объединены результаты прогнозирования по percentile-lasso при заданных уровнях квантилей оптимального параметра регуляризации. Если сравнивать эти результаты с обычной реализацией LASSO (табл. 1), то они в большинстве случаев оказываются хуже или примерно такие же.

Следовательно, percentile-lasso не дает существенных преимуществ в качестве прогнозирования, однако требует гораздо большего вычислительного времени. Поэтому далее результаты LASSO с 10-блочной кросс-валидацией со случайным формированием блоков и выбором параметра регуляризации по правилу одной стандартной ошибки признаются как лучшие.

Таблица 2

Table 2

MAE для percentile-lasso

MAE for percentile-lasso

Отклик	Уровень квантиля	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
y_1	0,95	1,613	0,730	0,950	1,772
y_2	0,8	4494	2578	2084	2407
y_3	0,8	0,150	0,050	0,065	0,070
y_4	0,75	0,209	0,120	0,064	0,051

Сопоставим результаты использования метода CFS с альтернативными методами (табл. 3). Преимущества отбора на основе корреляций проявляются при прогнозировании уровня безработицы и коэффициента напряженности на рынке труда. При сравнении этих результатов со средними ошибками регрессии LASSO 10-fold CV $\lambda = 1se$ (см. табл. 1) оказывается, что если не принимать во внимание несколько провальных прогнозов, LASSO обеспечивает лучшие прогнозы. Для показателя уровня регистрируемой безработицы LASSO имеет абсолютное преимущество. Для показателя заявленной работодателями потребности в работниках LASSO обеспечивает лучшие результаты на всем горизонте прогнозирования, кроме 2015 г. Коэффициент напряженности на рынке труда лучше всего прогнозируется с помощью LASSO в 2016–2017 гг., а численность безработных – в 2015–2016 гг.

Таблица 3

Table 3

MAE для CFS и альтернативных методов

MAE for CFS and alternative methods

Отклик	Метод прогнозирования	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
y_1	Модель ARIMA	2,254	4,314	2,147	1,328
	Модель Хольта–Уинтерса	2,300	2,159	0,893	0,660
	ES	1,341	2,895	1,583	0,926
	CFS	2,069	1,019	0,905	1,694

Окончание табл. 3

End of Tab. 3

Отклик	Метод прогнозирования	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
y ₂	Модель ARIMA	6361	3943	3060	2455
	Модель Хольта–Уинтерса	2770	2945	2684	4621
	ES	1760	2482	2596	3404
	CFS	17620	3215	2853	2251
y ₃	Модель ARIMA	0,235	0,116	0,123	0,103
	Модель Хольта–Уинтерса	0,203	0,174	0,160	0,090
	ES	0,183	0,066	0,136	0,119
	CFS	0,216	0,063	0,072	0,090
y ₄	Модель ARIMA	0,162	0,117	0,102	0,068
	Модель Хольта–Уинтерса	0,132	0,135	0,080	0,058
	ES	0,088	0,114	0,096	0,031
	CFS	0,440	0,097	0,072	0,036

Таким образом, показана возможность прогнозирования состояния рынка труда НСО на основе опережающих индикаторов путем их автоматического подбора на основе регрессии LASSO. Выделенные экономические показатели на полгода раньше по сравнению с уровнем безработицы реагируют на циклические изменения в экономике. Это позволяет предсказать изменения на рынке труда на основе динамики показателей денежной массы, структуры баланса кредитных организаций и индексов цен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе предложен алгоритм построения прогнозных моделей, описывающих состояние регионального рынка труда, новизна которого состоит в автоматическом подборе опережающих индикаторов. Для этого использованы методы отбора признаков на базе фильтров (отбор на основе корреляций) и восторженные методы (регрессия LASSO). В ходе эмпирического исследования сравнивалось качество прогнозирования с использованием предложенного алгоритма и альтернативными методами (с помощью моделей ARIMA, Хольта–Уинтерса, экспоненциального сглаживания). Исследованы различные процедуры кросс-валидации, применяемые для выбора параметра регуляризации в регрессии LASSO, а также устойчивая модификация percentile-lasso. Оказалось, что лучший результат обеспечивает регрессия LASSO с 10-блочной кросс-валидацией со случайным формированием блоков и выбором параметра регуляризации по правилу одной стандартной ошибки. Сопоставление результатов прогнозирования с помощью опережающих индикато-

ров с альтернативными методами показало преимущества использования индикаторов для долгосрочного прогноза (на полгода вперед), особенно при прогнозировании уровня безработицы в НСО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stock J., Watson M.* Forecasting using principal components from a large number of predictors // *Journal of the American Statistical Association*. – 2002. – Vol. 297. – P. 1167–1179. – DOI: 10.1198/016214502388618960.
2. *Boivin J., Ng S.* Are more data always better for factor analysis? // *Journal of Econometrics*. – 2006. – Vol. 132, N 1. – P. 169–194. – DOI: 10.1016/j.jeconom.2005.01.027.
3. *Tibshirani R.* Regression shrinkage and selection via the lasso: a retrospective // *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*. – 2011. – Vol. 73, N 3. – P. 273–282. – DOI: 10.1111/j.1467-9868.2011.00771.x.
4. Tactical sales forecasting using a very large set of macroeconomic indicators / Y.R. Sagaert, E.H. Aghezzaf, N. Kourentzes, B. Desmet // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – Vol. 264, N 2. – P. 558–569. – DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.054.
5. *Bulligan G., Marcellino M., Venditti F.* Forecasting economic activity with targeted predictors // *International Journal of Forecasting*. – 2015. – Vol. 31, N 1. – P. 188–206. – DOI: 10.1016/j.ijforecast.2014.03.004.
6. *Ma S., Fildes R., Huang T.* Demand forecasting with high dimensional data: the case of SKU retail sales forecasting with intra-and inter-category promotional information // *European Journal of Operational Research*. – 2016. – Vol. 249, N 1. – P. 245–257. – DOI: 10.1016/j.ejor.2015.08.029.
7. *Hall M.A.* Correlation-based feature selection for machine learning: PhD thesis. – Hamilton: University of Waikato, 1999.
8. *Timofeeva A.Y., Mezentssev Y.A.* Forecasting using predictor selection from a large set of highly correlated variables // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2019. – Vol. 2416: Information Technology and Nanotechnology: Data Science. – P. 10–18.
9. *Lund K.V.* The Instability of cross-validated LASSO: Master's thesis / Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo. – Oslo, 2013.
10. *Roberts S., Nowak G.* Stabilizing the lasso against cross-validation variability // *Computational Statistics and Data Analysis*. – 2014. – Vol. 70. – P. 198–211. – DOI: 10.1016/j.csda.2013.09.008.
11. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess / R.B. Cleveland, W.S. Cleveland, J.E. McRae, I. Terpenning // *Journal of Official Statistics*. – 1990. – Vol. 6. – P. 3–73.
12. *Brockwell P.J., Davis R.A., Calder M.V.* Introduction to time series and forecasting. – New York: Springer, 2002. – 425 p.
13. Open source and enterprise-ready professional software for data science [Electronic resource]. – URL: <https://rstudio.com/> (accessed: 12.12.2019).
14. Статистическая информация о ситуации на регистрируемом рынке труда [Электронный ресурс] // Роструд: web-сайт. – URL: https://www.rostrud.ru/rostrud/deyatelnost/?CAT_ID=6293 (accessed: 12.12.2019).
15. ЕМИСС – Единая межведомственная информационно-статистическая система [Электронный ресурс]: web-сайт. – URL: <https://fedstat.ru/> (accessed: 12.12.2019).

Тимофеева Анастасия Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – развитие методов статистического анализа объектов стохастической природы, в том числе социально-экономических явлений. Имеет более 100 научных публикаций. E-mail: a.timofeeva@corp.nstu.ru.

Timofeeva Anastasia Yuryevna, PhD (Eng.), an associate professor at the theoretical and applied informatics department, Novosibirsk State Technical University. The main direction of scientific research is of methods for statistical analysis of objects of stochastic nature, including socio-economic phenomena. He is the author of more than 100 publications. E-mail: a.timofeeva@corp.nstu.ru.

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-85-98

Automatic selection of leading indicators for regional labor market forecasting*

A.Yu. TIMOFEEVA

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

a.timofeeva@corp.nstu.ru

Abstract

The problem of selection of most informative variables from a set of candidate predictors arises when constructing forecast models based on leading indicators. This problem can be solved by embedded methods, such as the LASSO regression, or filter methods, for example, using the correlation-based feature selection. The task of this paper is to compare the performance of these methods with alternative approaches to the time series analysis (ARIMA, the Holt-Winters model, and exponential smoothing). For this, an algorithm for constructing forecast models is proposed, including automatic selection of leading indicators. To conduct an empirical study, indicators suitable for regional labor market predicting were selected from official statistics. They describe indicators such as money supply, a balance sheet structure of credit institutions and a price index. A pseudo-out-of-sample forecasting of a number of indicators characterizing the situation in the registered labor market of the Novosibirsk Region for the period from 2015 to 2018 was carried out. Direct multi-step forecasts were computed for horizons of 6 months. It turned out that a stable modification of the LASSO, the percentile-lasso, does not give any advantages in terms of average absolute forecast errors. In most cases, the best results were obtained using the LASSO regression with the choice of the regularization parameter according to the one standard error rule based on block cross-validation with 10 blocks selected at random. Due to the automatic selection of leading indicators, it was possible to reduce forecasting errors in comparison with alternative methods. Thus, the proposed algorithm is appropriate for regional labor market predicting.

Keywords: variable selection, LASSO regression, percentile-lasso, correlation-based feature selection, leading indicators, labor market, forecasting, ARIMA, Holt-Winters model, STL algorithm

REFERENCES

1. Stock J., Watson M. Forecasting using principal components from a large number of predictors. *Journal of the American Statistical Association*, 2002, vol. 297, pp. 1167–1179. DOI: 10.1198/016214502388618960.
2. Boivin J., Ng S. Are more data always better for factor analysis? *Journal of Econometrics*, 2006, vol. 132, no. 1, pp. 169–194. DOI: 10.1016/j.jeconom.2005.01.027.
3. Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso: a retrospective. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 2011, vol. 73, no. 3, pp. 273–282. DOI: 10.1111/j.1467-9868.2011.00771.x.

* Received 22 September 2019.

4. Sagaert Y.R., Aghezzaf E.H., Kourentzes N., Desmet B. Tactical sales forecasting using a very large set of macroeconomic indicators. *European Journal of Operational Research*, 2018, vol. 264, no. 2, pp. 558–569. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.054.
5. Bulligan G., Marcellino M., Venditti F. Forecasting economic activity with targeted predictors. *International Journal of Forecasting*, 2015, vol. 31, no. 1, pp. 188–206. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2014.03.004.
6. Ma S., Fildes R., Huang T. Demand forecasting with high dimensional data: the case of SKU retail sales forecasting with intra-and inter-category promotional information. *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 249, no. 1, pp. 245–257. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.08.029.
7. Hall M.A. *Correlation-based feature selection for machine learning*. PhD thesis. Hamilton, University of Waikato, 1999.
8. Timofeeva A.Y., Mezentsev Y.A. Forecasting using predictor selection from a large set of highly correlated variables. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2416. *Information Technology and Nanotechnology: Data Science*, pp. 10–18.
9. Lund K.V. *The instability of cross-validated LASSO*. Master's thesis. Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, 2013.
10. Roberts S., Nowak G. Stabilizing the lasso against cross-validation variability. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2014, vol. 70, pp. 198–211. DOI: 10.1016/j.csda.2013.09.008.
11. Cleveland R.B., Cleveland W.S., McRae J.E., Terpenning I. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 1990, vol. 6, pp. 3–73.
12. Brockwell P.J., Davis R.A., Calder M.V. *Introduction to time series and forecasting*. New York, Springer, 2002. 425 p.
13. *Open source and enterprise-ready professional software for data science*. Available at: <https://rstudio.com/> (accessed 12.12.2019).
14. Statisticheskaya informatsiya o situatsii na registriruemom rynke truda [Statistical information on the situation in the registered labor market]. *Rostrud* [Federal Service for Labour and Employment]: website. Available at: https://www.rostrud.ru/rostrud/deyatelnost/?CAT_ID=6293 (accessed 12.12.2019).
15. EMISS (Unified interdepartmental information and statistical system): website. (In Russian). Available at: <https://fedstat.ru> (accessed 12.12.2019).

Для цитирования:

Тимофеева А.Ю. Автоматический подбор опережающих индикаторов для прогнозирования состояния регионального рынка труда // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (77). – С. 85–98. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-85-98.

For citation:

Timofeeva A.Yu. Avtomaticheskii podbor operezhayushchikh indikatorov dlya prognozirovaniya sostoyaniya regional'nogo rynka truda [Automatic selection of leading indicators for regional labor market forecasting]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (77), pp. 85–98. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-85-98.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 004.82

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-99-120

Контролируемый естественный язык для работы с онтологиями*

В.И. ХАБАРОВ^{1,a}, И.С. СТЕПАНОВ^{2,b}, А.А. СЕРЕНКО^{3,c}

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

² 630049, РФ, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, Сибирский государственный университет путей сообщения

³ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 6, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН

^a khabarov51@mail.ru ^b step_il@mail.ru ^c fafnur@yandex.ru

Работа содержит описание контролируемого естественного языка, предназначенного для работы с онтологиями. Благодаря формализованному определению понятийной структуры предметной сферы в онтологии становится возможной машинная обработка онтологических сведений, применяемая в новых поисковиках, системах информационной интеграции, экспертных системах.

Приводится краткий анализ аналогов, а также обоснование необходимости разработки специализированного языка. Систематизированы требования, предъявляемые к языку с учетом области применения. Описано позиционирование разрабатываемого языка по отношению к другим представителям группы онтологических языков. В настоящей работе предлагается один из возможных вариантов контролируемого языка, изначально ориентированный на русскоязычного пользователя. Однако, как показала практика, мультиязычный вариант представления оказался возможным и весьма полезным для целей профессионального обучения в связи с тем, что структура многих языков может быть представлена достаточно единообразно. Поскольку контролируемый естественный язык является подмножеством естественного языка, он не противоречит синтаксическим правилам русского языка, а также его лексемы семантически соответствуют. В свою очередь, естественный язык является более выразительным и сложным. При этом контролируемый естественный язык должен однозначно отображаться в стандартный язык представления онтологий OWL. Язык OWL базируется на дескриптивной логике (DL), ввиду этого достигается трехстороннее соответствие языков.

Дано описание структуры, синтаксиса и грамматики языка, представление дескриптивной логики и правил в конструкциях языка. Приведены примеры представления знаний в описываемом формате в сравнении с аналогами. Описано использование контролируемого естественного языка для составления повествования с поддержкой онтологического формата. В рамках разработки языка некоторые конструкции были упрощены относительно англоязычного аналога, а также адаптированы к специфике русского языка.

* Статья получена 03 сентября 2019 г.

Эффективность процесса управления знаниями напрямую зависит от формы их представления. Широкое распространение онтологий в целях организации контента открывает новые возможности для работы с семантикой, заключенной в текстах. Контролируемый естественный язык является двунаправленным, воспринимаемым как человеком, так и машиной логического вывода. Его использование позволит найти более широкое применение онтологиям, а также снизить порог входа для работы с ними.

Ключевые слова: контролируемый естественный язык, язык описания онтологий, онтология, инженерия знаний, база знаний, представление знаний, механизм логического вывода, редактор онтологий, мультязычность, семантика, трансляторы

ВВЕДЕНИЕ

Ограниченный естественный язык обычно используется для лаконичного и точного представления знания в конкретной профессиональной предметной области. Например, ограниченный язык профессиональной прозы используется при написании научных статей, технической документации, справочников, учебников и пр. Однако, имея определенные ограничения на стиль и на используемый словарь понятий, такой язык не обладает достаточной для однозначного машинного представления точностью выражения смысла. В связи с этим возникает потребность в разработке контролируемого естественного языка (КЕЯ) с более жесткими ограничениями на синтаксис и семантику. Это дает возможность, с одной стороны, компилировать тексты на КЕЯ в машинные формы представления знаний, а с другой стороны, естественно воспринимать их человеком без какой-либо специальной подготовки [1].

КЕЯ открывает новые возможности привлечения специалистов из различных предметных областей для создания современных систем, основанных на технологиях обработки знаний. Контролируемый естественный язык по существу является формой представления онтологий, которые в настоящее время широко используются как способ профессиональных коммуникаций, инструмент для поиска информации, средство представления образовательного контента, форма представления знаний для систем искусственного интеллекта. КЕЯ способствует не только повышению уровня машинного восприятия информации, но и снижению порога входа для людей, работающих со знаниями.

Следует отметить, что КЕЯ зависит от используемого естественного языка. В англоязычных странах контролируемый английский язык широко применяется для создания контента, семантика которого однозначно воспринимается машинами. Наиболее ярким примером является ACEWIKI. Реализация, применение и решение типовых задач с использованием контролируемых языков на примере данного проекта подробно представлены в [2]. Наиболее популярные на сегодняшний день редакторы онтологий, такие как, например, Protege и Top Braid Composer, требуют определенной подготовки пользователя с точки зрения работы с интерфейсами данных программ и, что более важно, компетенции в инженерии знаний. Использование КЕЯ для работы пользователей со знаниями, в частности с такой формой их представления, как онтологии, нашли свою реализацию в продукте Fluent Editor 2015. Интерфейс данной программы позволяет использовать привычные англоязычные конструкции для описания предметной области [3].

В русскоязычном сегменте на сегодняшний день ситуация в области разработки КЕЯ выглядит достаточно скромно. Можно, пожалуй, указать всего один ресурс, позволяющий создавать базы знаний на контролируемом русском языке [4]. Но предлагаемый язык не предназначен для неподготовленных пользователей. Для сравнения, существует более ста версий контролируемого английского языка, которые нашли прикладное применение и развитие.

На данный момент разработка в области инструментария по работе с онтологиями ведется в направлении графических редакторов и текстовых [5]. Таким образом, задача разработки КЕЯ для русскоязычного ресурса с контентом в формате онтологий является актуальной. С акцентом на образование онтологический формат представления знаний является своевременным в связи с нарастающей тенденцией цифровой трансформации данной отрасли [6].

В настоящей работе предлагается один из возможных вариантов КЕЯ, изначально ориентированный на русскоязычного пользователя. Однако, как показала практика, мультязычный вариант представления оказался возможным и весьма полезным для целей профессионального обучения в связи с тем, что структура многих языков может быть представлена достаточно единообразно.

1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КЕЯ

Контролируемый естественный язык (КЕЯ) в данной работе относится к классу онтологических языков (ОЯ). К числу основных требований, предъявляемых к онтологическим языкам, например в [7], отнесены следующие требования:

- четко определенный синтаксис;
- эпистемологическая адекватность, то есть способность выразить все понятия и отношения в данной предметной области;
- использование логики как основы для языка (логика первого порядка, дескриптивная логика, модальная логика);
- достаточная выразительная сила, способствующая восприятию текста человеком;
- строгость кодирования для однозначной машинной интерпретации понятий, связей, аксиом;
- возможность выполнять логический вывод, основываясь на структурных компонентах языка;
- функциональная полнота, необходимая для решения различных задач при операциях с онтологиями: построение и совместное использование онтологий, обмен знаниями, взаимодействие с онтологиями;
- однозначная интерпретация смысла, выраженного в знаниевых сущностях, не только создателями онтологии, но и внешними агентами (пользователями, программами и т. п.).

Сформулируем дополнительные требования, которым должен удовлетворять КЕЯ:

- КЕЯ является подмножеством естественного языка;
- КЕЯ должен быть однозначно отображаться в OWL [8].

Поскольку КЕЯ является подмножеством естественного языка, он не противоречит синтаксическим правилам ЕЯ, а также его лексемы семантически соответствуют ЕЯ. В свою очередь, естественный язык является более выразительным и сложным. При этом КЕЯ должен однозначно отображаться в стандартный язык представления онтологий OWL. Язык OWL базируется на дескриптивной логике (DL), ввиду этого достигается трехстороннее соответствие языков (рис. 1).

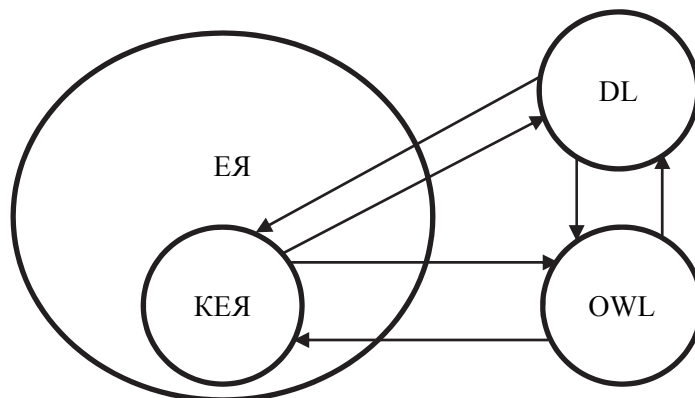


Рис. 1. Отношение между языками OWL, DL, ЕЯ и КЕЯ

Fig. 1. Relations between the OWL, DL, ЕЯ and КЕЯ languages

2. СТРУКТУРА ЯЗЫКА

Любой язык состоит из набора понятий и связей между ними. Для удобства восприятия, а также в целях соответствия современным стандартам представления знаний [9] все понятия были разделены на три базовых класса:

- объект – сущность, содержащая информацию о понятии, как минимум название и идентификатор;
- отношение – сущность, отвечающая за связь между понятиями. В OWL данный класс представлен как `ObjectProperty`;
- свойство – сущность, отвечающая за связь между понятиями и их характеристиками. В OWL данный класс представлен как `DataProperty`.

Стоит отметить, что отношение и свойство являются подклассами объекта, но, чтобы не усложнять структуру онтологии, они были вынесены в отдельные иерархии. В общем случае каждый из классов имеет свои отношения и свойства, как минимум родовидовые отношения и лингвистические свойства.

В основе языка лежит триплетная запись. Важно учитывать, что, несмотря на изначальную простоту данной структуры, с помощью нее можно выстраивать довольно сложные языковые конструкции благодаря тому, что в качестве субъектов и объектов могут выступать не только понятия, но и сами триплеты. И вложенность эта ограничивается только возможностями человеческого восприятия и вычислительными затратами. Наиболее распространенным применением данной конструкции является запись правил, где в каче-

стве отношения выступает причинно-следственная связь, а в качестве субъекта и объекта – триплет, содержащий условие выполнения правила, и триплет, содержащий следствие его выполнения соответственно.

Структура данной конструкции представлена на рис. 2.

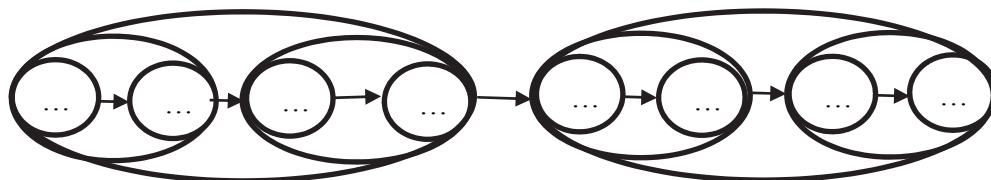


Рис. 2. Структура вложенности триплетных записей

Fig. 2. A structure of triplet record nesting

Кроме того, данная структура соответствует фреймовому формату представления знаний [10].

3. БАЗОВЫЕ КЛАССЫ ОТНОШЕНИЙ

При реализации онтологий ключевую роль играют родовидовые отношения между понятиями. В большинстве языков описания онтологий для данного отношения выделяют специальные языковые конструкции. В КАЯ Every <C> is a <D>, в OWL используется стандартное отношение SubClassOf. Но ввод ограничений на формат записи родовидового отношения существенно снижает выразительность языка описания предметной области. Кроме того, данный подход требует ввода этого отношения для каждого из языков представления (русского, китайского, английского).

Для рассматриваемого языка выработан следующий подход: для выделенных отношений вводится не служебная конструкция языка, а отдельный класс, который содержит все отношения, содержащие в себе родовидовую семантику или семантику отношения часть–целое, а также обратные им.

Таким образом, при работе с данным языком нет ограничений в выразительных средствах при вводе базовых отношений. Возможно использование любых синонимов при условии, что они унаследуют семантику заданного родительского класса.

Список наиболее значимых с точки зрения построения онтологий отношений представлен в приложении 3 к книге [11].

На данный момент среди базовых выделены следующие отношения:

- класс – подкласс;
- подкласс – класс;
- часть – целое;
- целое – часть;
- причина – следствие;
- следствие – причина.

Данный перечень является расширяемым в зависимости от предметной области, возможно введение новых классов отношений. Для этого необходимо задать класс и описать правила обработки его элементов.

4. СТРУКТУРЫ И СЦЕНАРИИ

Согласно [12] люди используют в своем мышлении сценарии – структуры с заданными параметрами объектов и последовательностью действий.

Так, например, ситуация обучения в общем случае будет включать два объекта: учителя и ученика, процесс передачи знаний, а также среду, в которой это происходит, и инструменты.

Структура типа «конструкция» будет иметь множество вложенных объектов, связанных между собой отношением «часть–целое».

В рамках реализации языка представляется возможным выделить счетное количество таких шаблонов, благодаря которым пользователь сможет в полной мере описать рассматриваемую предметную область.

Данные шаблоны служат еще одним уровнем стандартизации знаний, регламентирующим не только форму представления, но и его порядок.

5. СЛУЖЕБНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЯЗЫКА

Для реализации поддержки дескриптивной логики необходимо ввести в язык служебные конструкции, влияющие на семантику понятий. Данные конструкции должны быть строго формализованы в языке и учтены в алгоритмах трансляции.

Данные конструкции можно разделить на две группы. Первая группа отвечает за реализацию дескриптивной логики (OWL–DL и OWL–EL). Конструкции дескриптивной логики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Название	Синтаксис	Реализация в языке
Понятие	A	Запись, стоящая на первом месте или третьем месте в триплете
Всеобщее, универсальное понятие	T	Что-либо (кто-либо) , или синонимы. Массив является расширяемым
Пустое понятие	⊥	Ничто (никто) , или синонимы. Массив является расширяемым
Пересечение	SPD	и , оператор ставится между понятиями на одном уровне табуляции с субъектами
Объединение	S∪D	или , оператор ставится между понятиями на одном уровне табуляции с субъектами
Симметричная разность	SΔD	либо , оператор ставится между понятиями на одном уровне табуляции с субъектами
Отрицание	¬C	не , оператор ставится перед триплетом на строку выше, после него табуляция триплета смещается на один отступ
Ограничение на значение	∀R.C	Принимается по умолчанию для классов
Квантификатор существования	∃R.C	Принимается по умолчанию для индивидов

Вторая группа отвечает за реализацию безопасных правил (Safe rules) [13]. Конструкции правил приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Название	Реализация в языке
Неявное задание классов	<p><Понятие><Служебная конструкция><Условие><Следствие></p> <p>Пример: Человек который имеет: сына; дочь является: родителем</p>
Правила (могут использовать несколько переменных при записи выражений)	<p>Если <Условие>, то <Следствие выполнения></p> <p>Пример: Если температура воздуха Имеет значение, C°= 20, то Ира должна надеть: футболку</p>

6. СИНТАКСИС И ГРАММАТИКА ЯЗЫКА

В рамках разработки синтаксиса онтологического языка основными задачами является идентификация объектов, отношений и субъектов, а также четкое структурное разграничение записей.

Определенную сложность представляют объекты, имена которых являются составными, поскольку в этом случае мы не можем использовать пробел в качестве разделителя между понятиями.

В продукте Fluent Editor 2015, упомянутом выше, задача решена путем введения дополнительного разделителя «-» (тире), которое служит для разделения слов в рамках одного понятия, а пробелы используются для разделения понятий между собой.

Пример записи триплета с составными понятиями в Fluent Editor 2015:
Company-I has-common-nameequal-to 'Tommy's-Pizza-and-Subs'.

В разрабатываемом КЕЯ также введены дополнительные разделители, принцип их организации взят из языков программирования. Для разделения

понятий используется табуляция, каждое следующее понятие начинается с новой строки и имеет больший отступ от начала строки чем следующее, за исключением перечислений субъектов.

Пример записи триплета с составными понятиями в разрабатываемом языке:

```
Company 1
  has common name=
    Tommy's Pizza and Subs.
```

Порядок записи строго определен: <объект> |<отношение><тип> | <субъект>.

Для определения типа используются следующие символы:

« : » – для обозначения отношения между объектами (object property), в этом случае субъектом выступает понятие;

« = » – для задания значений свойствам объекта (data property), в этом случае субъектом выступают числовые или текстовые данные.

В представлении онтологии, которое используется для чтения, символы, идентифицирующие тип отношения, не отображаются, для того чтобы не затруднять чтение конструкциями, не типичными для естественного языка.

Каждый новый триплет записывается с новой строки, в конце его ставится точка. Так, каждый триплет является отдельным предложением.

Структура языка должна позволять не только описывать знания, но и строить запросы к ним на естественном языке [14].

Ниже представлены примеры использования данного языка.

Особенности разрабатываемого языка будут рассматриваться в сравнении с OWL, а также с англоязычным аналогом.

- **OWL** – Web Ontology Language;
- **FE (controlled English)** – Fluent Editor 2015;
- **Onto (controlled Russian)** – Onto.plus.

В табл. 3–14 представлено сравнение аналогичных представлений на трех языках.

Таблица 3

Table 3

Классы		
OWL	FE	Onto
ИгрокХоккейнойКоманды	Игрок–хоккейной–команды	игрок хоккейной команды
Целостность составного объекта достигается за счет исключения пробелов Разделение слов происходит за счет заглавных букв	Целостность составного объекта достигается за счет замены пробелов на тире Тире служит разделителем слов	Целостность составного объекта достигается за счет принципа «одна строка – один объект» Слова разделяются пробелом

Таблица 4

Table 4

Экземпляр		
OWL	FE	Onto
<pre><ClassAssertion> <Class IRI=" ИгрокиХоккей- нойКоманды "/> <NamedIndividual IRI="Василий"/> </ClassAssertion></pre>	Василий is a игрок– хоккейной–команды	Василий это: игрок хоккей- ной команды
Экземпляр задается явно	Экземпляр определяется по признаку заглавной буквы Классы прописываются нижним регистром, экземпляры начинаются с заглавной	Целостность составного объекта достигается за счет принципа «одна строка – один объект» Слова разделяются пробелом

Классы и экземпляры отличаются за счет регистров и спецсимволов.

Таблица 5

Table 5

Свойства		
OWL	FE	Onto
<pre><DataPropertyAssertion> <DataProperty IRI="hasAge" /> <NamedIndividual IRI="Tom" /> <Literal>23</Literal> </DataPropertyAssertion></pre>	Tom has-age equal-to 23	Василий возраст= 23
Свойство задается явно	Свойство определяется явным заданием его значения, через оператор: equal-to	Свойство определяется явным заданием его значения через оператор «=»

Таблица 6

Table 6

Включения классов		
OWL	FE	Onto
<pre><SubClassOf> <Class IRI="Tree" /> <Class IRI="Plant" /> </SubClassOf></pre>	Every tree is a plant	деревья это: растения
Отношение включения задается явно	Отношение иерархии характеризуется обобщением в начале предложения	Отношение иерархии. Обобщение принимается по умолчанию
<pre><SubClassOf> <Class IRI="Branch" /> <ObjectSomeValuesFrom> <ObjectProperty IRI="isPartOf"/> <Class IRI="Tree" /> </ObjectSomeValuesFrom> </SubClassOf></pre>	Every branch is-part-of a tree	ветки являются частью: деревьев
Экзистенциальное ограничение роли. Отношение агрегации задается явно, между классом, заданным явно и классом, заданным неявно (части деревьев)	Отношение часть–целое характеризуется обобщением в начале предложения	Отношение часть–целое. Обобщение принимается по умолчанию
<pre><SubClassOf> <Class IRI="Lion" /> <ObjectAllValuesFrom> <ObjectProperty IRI="eats"/> <Class IRI="Herbivore" /> </ObjectAllValuesFrom> </SubClassOf></pre>	Every lion eats nothing-but herbivore	львы едят: только растения
Универсальное ограничение роли. Отношение включения задается явно Между львами и всеми, кто ест только травоядных	Отношение агрегации характеризуется обобщением в начале предложения. Родительский класс формируется по значению признака «едят». Для этого вводится ограничительная конструкция	Отношение агрегации. За счет вводной конструкции только накладывается ограничение за значение отношения «едят»

Оба типа ограничения (экзистенциальные и универсальные) дополняют друг друга. Отличаются они введением ключевого слова «только».

Окончание табл. 6

End of Tab. 6

Включения классов		
OWL	FE	Onto
<pre><SubClassOf> <Class IRI="Giraffe" /> <ObjectAllValuesFrom> <ObjectProperty IRI="eats"/> <ObjectUnionOf> <Class IRI="Leaf" /> <Class IRI="Twig" /> </ObjectUnionOf> </ObjectAllValuesFrom> </SubClassOf></pre>	<p>Every giraffe eats nothing-but thing that is a leaf and-or is a twig</p>	<p>Жирафы едят только: листки или едят только: ветки. <i>Короткая запись:</i> жирафы едят только: листки или ветки</p>
<p>Отношение включения задается явно. Пример, в котором область определения значения отношения задана объединением и пересечением двух классов</p>	<p>Для неявного задания используется универсальный концепт с ограничениями</p>	<p>Ограничения задаются явно. Для удобства сформулирована короткая форма записи без дублирования отношений</p>
<pre><SubClassOf> <Class IRI="TastyPlant" /> <ObjectIntersectionOf> <ObjectSomeValuesFrom> <ObjectInverseOf> <ObjectProperty IRI="eats"/> </ObjectInverseOf> <Class IRI="Carnivore" /> </ObjectSomeValuesFrom> <ObjectSomeValuesFrom> <ObjectInverseOf> <ObjectProperty IRI="eats"/> </ObjectInverseOf> <Class IRI="Herbivore" /> </ObjectSomeValuesFrom> </ObjectIntersectionOf> </SubClassOf></pre>	<p>Every tasty-plant is eaten by a carnivore and is eaten by a herbivore</p>	<p>Вкусные растения Служат пищей: травоядным и Служат пищей: хищникам</p>
<p>Пример, в котором область определения задана пересечением. Пересекаются классы хищников и травоядных</p>	<p>Отношение включения характеризуется обобщением в начале предложения</p>	<p>Пересечение идет на уровне отношений, поскольку они могут отличаться, и объединение на уровне субъектов не работает</p>
<pre><SubClassOf> <Class IRI="PalmTree" /> <ObjectSomeValuesFrom> <ObjectProperty IRI="hasPart"/> <ObjectComplementOf> <Class IRI="Branch" /> </ObjectComplementOf> </ObjectSomeValuesFrom> </SubClassOf></pre>	<p>Every palm-tree has-part something that is not a branch</p>	<p>пальмы не состоят из: веток</p>
<p>Пример, в котором область определения задана дополнением (исключением из множества)</p>	<p>Отношение включения характеризуется обобщением в начале предложения</p>	<p>За счет вводной конструкции «не». Происходит исключение из множества</p>

Таблица 7

Table 7

Эквивалентность классов		
OWL	FE	Onto
<pre><EquivalentClasses> <Class IRI="Boy" /> <Class IRI="YoungMaleMan" /> </EquivalentClasses></pre>	Something is a boy if-and-only-if-it is a young-male-man	мальчик эквивалентен: юноша
Отношение эквивалентности задается явно	Отношение определяется через универсальный концепт, который может относиться к одному классу, только в случае если относится к другому. Это условие характеризуется вводной конструкцией	Явное задание отношения между классами
<pre><EquivalentClasses> <Class IRI="Man" /> <ObjectIntersectionOf> <Class IRI="Adult" /> <Class IRI="Male" /> <Class IRI="Person" /> </ObjectIntersectionOf> </EquivalentClasses></pre>	Something is a man if-and-only-if-it is an adult that is a male and is a person	Кто-то эквивалентен: мужчине только если является: взрослым который является: человек мужского пола...
Пример, в котором класс эквивалентен пересечению трех других классов	Класс задан не явно через пересечение	Класс задан не явно через пересечение

Эквивалентность – частный случай включения, при котором каждый из классов целиком включает друг друга.

Таблица 8

Table 8

Непересекающиеся классы.		
OWL	FE	Onto
<pre><SubClassOf> <Class IRI="Herbivore" /> <ObjectComplementOf> <Class IRI="Carnivore" /> </ObjectComplementOf> </SubClassOf></pre>	Every herbivore is not a carnivore	травоядные не являются: хищниками
Запись определяет непересекающийся класс через эквивалент его дополнения	Все элементы одного класса не являются элементами другого	Все элементы одного класса не являются элементами другого

Дополнительный атрибут отношения, который накладывает ограничение на количество связей между классами.

Таблица 9

Table 9

Ограничение множеств		
OWL	FE	Onto
<pre><SubClassOf> <Class IRI="Person" /> <ObjectMaxCardinality cardinality="2" > <ObjectProperty IRI="isChildOf"/> <Class IRI="Parent"/> </ObjectMaxCardinality> </SubClassOf></pre>	Every person is-a-child-of at-most two parents	человек является ребенком: максимум 2 родителей
Атрибут ограничения сверху. Задается максимальное количество связей между экземплярами классов	Атрибут задается вводной конструкцией, а также числом либо словом, обозначающим число (числа до десяти имеют в языке словесные эквиваленты)	Атрибут задается вводной конструкцией «максимум» и числом
<pre><SubClassOf> <Class IRI="Person" /> <ObjectMinCardinality cardinality="2" > <ObjectProperty IRI="isChildOf"/> <Class IRI="Parent"/> </ObjectMinCardinality> </SubClassOf></pre>	Every person is-a-child-of at-least two parents	человек является ребенком: минимум 2 родителей
Атрибут ограничения снизу. Задается минимальное количество связей между экземплярами классов	Атрибут задается вводной конструкцией, а также числом либо словом, обозначающим число	Атрибут задается вводной конструкцией «минимум» и числом
<pre><SubClassOf> <Class IRI="Person" /> <ObjectExactCardinality cardinality="2" > <ObjectProperty IRI="isChildOf"/> <Class IRI="Parent"/> </ObjectExactCardinality> </SubClassOf></pre>	Every person is-a-child-of two parents	человек является ребенком: ровно 2 родителей

Таблица 10

Table 10

Значение	FE	Onto	OWL
<2	less-than two	меньше 2	<ObjectMaxCardinality cardinality="1">
>2	more-than two	больше 2	<ObjectMinCardinality cardinality="3">
≤2	at-most two	максимум 2	<ObjectMaxCardinality cardinality="2">
≥2	at-least two	минимум 2	<ObjectMinCardinality cardinality="2">
≠2	different-than two	не ровно 2	<ObjectMinCardinality cardinality="3"><ObjectMaxCardinality cardinality="1">
=2	two	ровно 2	<ObjectExactCardinality cardinality="2" >

В контролируемом языке есть несколько вводных конструкций, но в OWL они транслируются таким образом, что выражаются только через максимум, минимум и «равно».

Для классов с несколькими экземплярами иногда приходится выделять ключевое свойство, которое является параметром идентификации уникальной записи.

Таблица 11

Table 11

Ключевые свойства		
OWL	FE	Onto
<pre><HasKey> <Class IRI="Man" /> <ObjectProperty IRI="hasId"/> </HasKey></pre>	Every X that is a man is-unique-if X has-id something	Все X которые являются: людьми уникальны если X имеет id: что-либо
Явное указание ключевого параметра	Задание параметра через вводную конструкцию	Задание параметра через вводную конструкцию

Таблица 12

Table 12

Задание сложных понятий		
OWL	FE	Onto
<pre><DLSafeRule> <Body> <ClassAtom> <Class IRI="Cat" /> <Variable IRI="CatX" /> </ClassAtom> <ClassAtom> <ObjectIntersectionOf> <Class IRI="Animal" /> <ObjectMinCardinality cardinality="5"> <ObjectProperty IRI="has" /> <Class IRI="Leg" /> </ObjectMinCardinality> </ObjectIntersectionOf> <Variable IRI="CatX" /> </ClassAtom> </Body> <Head> <ClassAtom> <ObjectComplementOf> <Class IRI="Bird" /> </ObjectComplementOf> <Variable IRI="CatX" /> </ClassAtom> </Head> </DLSafeRule></pre>	If a cat is an animal that has at-least five legs then the cat is something that is not a bird	Если кошка является: животным которое имеет: минимум 5 ног то эта кошка является: чем-то, что не является: птицей

Окончание табл. 12

End of Tab. 12

Задание сложных понятий		
OWL	FE	Onto
Задание класса через набор условий. "Cat" – исходный класс. "CatX" – определяемый класс	Через условную конструкцию описывается правило, по которому неявно заданный подкласс является не пересекаемым с другим классом	Через условную конструкцию описывается правило, по которому не явно заданный подкласс является не пересекаемым с другим классом

Таблица 13

Table 13

Задание экземпляров		
OWL	FE	Onto
<pre><ClassAssertion> <Class IRI="Giraffe" /> <NamedIndividual IRI="Sophie" /> </ClassAssertion></pre>	Sophie is a giraffe	София это: жираф
Экземпляр задается явно	Экземпляр распознается за счет написания его с заглавной буквы	Экземпляр распознается за счет написания его с заглавной буквы

Таблица 14

Table 14

Подклассы отношений		
OWL	FE	Onto
<pre><SubObjectPropertyOf> <ObjectProperty IRI="isProperPartOf" /> <ObjectProperty IRI="isPartOf" /> </SubObjectPropertyOf></pre>	If X is-proper-part-of Y then X is-part-of Y	Отношение собственная часть это: быть частью
Явное задание подмножества	Задание через условия и переменные	Явное задание через вводную конструкцию «Отношение»

Отдельно стоит рассмотреть задачу задания аксиом, потому как в OWL часть из них является стандартной характеристикой отношений. Люди же, как правило, не оперируют в данных категориях. Для человека привычнее рассматривать то или иное утверждение на примере объектов. Сравнение задания аксиом рассмотрено в табл. 15.

Таблица 15

Table 15

Транзитивность		
OWL	FE	Onto
<pre><TransitiveObjectProperty> <ObjectProperty IRI="hasPart" /> </TransitiveObjectProperty></pre>	<p>If X has-part something that has-part Y then X has-part Y</p>	<p>Если X состоит из: чего-либо, что состоит из: Y, то X состоит из: Y</p>
Явное задание транзитивности отношения	Задание через условия и переменные	Задание через условия и переменные
Рефлексивность		
OWL	FE	Onto
<pre><ReflexiveObjectProperty> <ObjectProperty IRI="isPartOf" /> </ReflexiveObjectProperty></pre>	<p>Every-single-thing is-part-of itself</p>	<p>Все X состоит из: X</p>
Явное задание рефлексивности отношения	Задание через условия и вводные конструкции	Задание через условия и переменные
Иррефлексивность		
OWL	FE	Onto
<pre><SubClassOf> <Class abbreviatedIRI="owl:Thing" /> > <ObjectComplementOf> <ObjectHasSelf> <ObjectProperty IRI="isProperPartOf" /> </ObjectHasSelf> </ObjectComplementOf> </SubClassOf></pre>	<p>Every-single-thing is not a thing that is-proper-part-of itself</p>	<p>Все X не состоит из: чего-либо, что состоит из: X</p>
Явное задание рефлексивности отношения	Задание через условия и вводные конструкции	Задание через условия и переменные
Симметричность		
OWL	FE	Onto
<pre><EquivalentObjectProperties> <ObjectProperty IRI="isFriendOf" /> <ObjectInverseOf> <ObjectProperty IRI="isFriendOf" /> </ObjectInverseOf> </EquivalentObjectProperties></pre>	<p>X is-friend-of Y if-and-only-if Y is-friend-of X</p>	<p>X друг: Y, только если Y друг: X</p>

Окончание табл. 15

End of Tab. 15

Симметричность		
OWL	OWL	OWL
Задание через эквивалентность и инверсию отношений.	Задание через условия, вводные конструкции и переменные	Задание через условия и переменные
Эквивалентность		
OWL	FE	Onto
<pre><EquivalentObjectProperties> <ObjectProperty IRI="isCloseTo" /> <ObjectProperty IRI="isNearTo" /> </EquivalentObjectProperties></pre>	X is-close-to Y if-and-only-if X is-near-to Y	X рядом с: Y, только если X не далеко: Y
Явное задание эквивалентности отношений	Задание через условия и переменные	Задание через условия и переменные
Непересекаемость		
OWL	FE	Onto
<pre><DisjointObjectProperties> <ObjectProperty IRI="hates" /> <ObjectProperty IRI="loves" /> </DisjointObjectProperties></pre>	If X loves Y then X does-not hate Y	X ненавидит: Y, только если X не любит: Y
Явное задание непересекаемости отношений	Задание через условия и переменные	Задание через условия и переменные

Обработка отрицаний отличается от английского языка. Поскольку в русском языке нет определенных правил, согласно которым частица «не» используется в определенном месте предложения, в КЕЯ она учитывается в составе отношения на любой позиции.

7. ПОВЕСТВОВАНИЕ

Задание онтологии на естественном языке позволяет сохранять порядок повествования и тем самым вводить в онтологии дополнительную семантику. Такой подход позволяет строить описание предметной области в порядке, предусмотренном автором онтологии (например, хронологическом или иерархическом).

В случае изложения материалов предметной области в виде повествования важную роль играет беспрепятственное восприятие текста информации –

гладкочтение. Данный термин включает в себя отсутствие символов, слов и конструкций, не предназначенных для естественного языка.

Разрабатываемый КЕЯ соответствует данным требованиям, а значит, будет понятен человеку без каких-либо специализированных навыков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках разработки КЕЯ получилось ограничить естественный язык, при этом сохранив его свойства гладкочтения, для обычного пользователя. Таким образом был сформирован язык, который, с одной стороны, беспрепятственно воспринимается человеком, а с другой – может быть интерпретирован как онтология машиной логического вывода. Данный язык поддерживает все необходимые стандарты для трансляции его в OWL и дальнейшей работы в других программных средах. КЕЯ базируется на дескриптивной логике и поддерживает все ее базовые конструкции, а также отвечает требованиям, предъявляемым к онтологическим языкам.

В рамках разработки языка некоторые конструкции были упрощены относительно англоязычного аналога, а также адаптированы к специфике русского языка.

Эффективность процесса управления знаниями напрямую зависит от формы их представления. Широкое распространение онтологий в целях организации контента открывает новые возможности для работы с семантикой, заключенной в текстах. Данная работа позволяет снизить порог входа для использования онтологий людьми без специальных навыков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Safwat H., Davis B., Zarrouk M.* Engineering an aligned gold-standard corpus of human to machine oriented Controlled Natural Language // 2018 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI). – Santiago, Chile, 2018. – P. 421–427. – DOI: 10.1109/WI.2018.00-58.
2. *Kuhn T.* Controlled English for knowledge representation: Doctoral thesis / Faculty of Economics, Business Administration and Information Technology of the University of Zurich. – Zurich, 2010. – 242 p.
3. *Weichbroth P.* Fluent editor and Controlled Natural Language in ontology development // International Journal on Artificial Intelligence Tools. – 2019. – Vol. 28, N 4. – P. 243.
4. *Милов Ю.П.* О стандарте сетевого русского языка, или Да здравствует КРЯ! // Информационные ресурсы России. – 2016. – № 3. – С. 40–41.
5. *Toti D., Longhi A.* SEMANTO: a graphical ontology management system for knowledge discovery // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2018. – Vol. 9, N 4. – P. 1075–1084.
6. *Хабаров В.И., Волегжанина И.С.* Цифровые трансформации в профессиональном образовании (на примере подготовки кадров транспорта): монография. – М.: Русайнс, 2018. – 210 с.
7. *Тузовский А.Ф., Чуриков С.В., Ямпольский В.З.* Системы управления знаниями (методы и технологии) / под общ. ред. В.З. Ямпольского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 258 с.
8. *W3C OWL Working Group.* Web Ontology Language [Electronic resource]. – URL: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/> (accessed: 13.12.2019).
9. *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем: учебное пособие. – СПб.: Питер, 2000. – 382 с.

10. Минский М. Фреймы для представления знаний. – М.: Мир, 1979. – 151 с.
11. Методы представления знаний: методические указания / сост. И.Л. Коробова. – Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. технол. ун-та, 2003. – 24 с.
12. Люгер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. – 4-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 283 с.
13. Hitzler P., Parsia B. Ontologies and rules // Handbook on ontologies / S. Staab, R. Studer (eds.). – Berlin: Springer, 2009. – P. 111–132.
14. Hu X., Dang D. Natural language aggregate query over RDF data / X. Hu, D. Dang, Y. Yao, L. Ye // Information Sciences. – 2018. – Vol. 454–455. – P. 363–381.

Хабаров Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор теоретической и прикладной информатики факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: искусственный интеллект, планирование эксперимента, статистические методы анализа данных, математическое моделирование транспортных потоков. Имеет более 150 публикаций. E-mail: khabarov51@mail.ru

Степанов Илья Сергеевич, аспирант кафедры информационных технологий на транспорте Сибирского государственного университета путей сообщения. Основное направление научных исследований – искусственный интеллект и интеллектуальные системы, основанные на знаниях. Имеет 6 публикаций. E-mail: step_il@mail.ru

Серенко Александр Андреевич, младший научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН. Основное направление научных исследований – искусственный интеллект и интеллектуальные системы, основанные на знаниях. Имеет 8 публикации. E-mail: fafnur@yandex.ru

Khabarov Valery Ivanovich, D.Sc. (Eng.), professor at the department of theoretical and applied informatics at the faculty of applied mathematics, Novosibirsk State Technical University. His main research fields include artificial intelligence, experiment design, statistical methods of data analysis and mathematical modeling of traffic flows. He is the author of more than 150 publications. E-mail: khabarov51@mail.ru

Stepanov Ilya Sergeevich, a postgraduate student at the department of information technologies, State Siberian Transport University. His research interests are focused on artificial intelligence and intelligent knowledge-based systems. He has published 6 research papers. E-mail: step_il@mail.ru

Serenko Alexander Andreevich, a junior research fellow at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, SB RAS. His main field of research covers artificial intelligence and intelligent knowledge-based systems. He is the author of 8 publications. E-mail: fafnur@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-99-120

Controlled natural language for ontology editing*V.I. KHABAROV^{1,a}, I.S. STEPANOV^{2,b}, A.A. SERENKO^{3,c}¹*Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*²*Siberian State Transport University, 191 Dusi Kovalchuk Street, Novosibirsk, 630049, Russian Federation*³*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Akademika Lavrenteva Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russian Federation*^a *khabarov51@mail.ru* ^b *step_il@mail.ru* ^c *fafnur@yandex.ru***Abstract**

The work contains a description of a controlled natural language intended for working with ontologies. Thanks to a formalized definition of the conceptual structure of the subject area in ontology, it is possible to automatically process ontological information which is used in new search engines, information integration systems, and expert systems.

A brief analysis of analogues is given, as well as the rationale for the need to develop a specialized language. The requirements for the language are systematized taking into account the scope. The positioning of the developed language in relation to other representatives of the group of ontological languages is described. In this paper, we propose one of the possible versions of a controlled language, initially oriented to a Russian-speaking user. However, as practice has shown, a multilingual version of the presentation turned out to be possible and very useful for vocational training purposes due to the fact that the structure of many languages can be represented quite uniformly. Since a controlled natural language is a subset of the natural language, it does not contradict the syntactic rules of the Russian language, and its lexemes are semantically consistent. In turn, a natural language is more expressive and complex. At the same time, a controlled natural language must be unambiguously mapped into the standard OWL ontology presentation language. OWL is based on a descriptive logic (DL) and because of this, trilateral language matching is achieved.

The description of the structure, syntax and grammar of the language is also given. Representation of a descriptive logic and rules in language constructs are described. Examples of knowledge representation in the described format in comparison with analogues are given. The use of a controlled natural language for compiling a narrative with support of the ontological format is described. As part of the development of the language, a number of designs were simplified with respect to the English-language analogue, and also adapted to the specifics of the Russian language.

The effectiveness of the knowledge management process directly depends on the form of their presentation. The widespread use of ontologies in order to organize the content opens up new possibilities for working with semantics contained in texts. A controlled natural language is bi-directional, perceived by both man and an inference machine. Its use will make it possible to find a wider application of ontologies, as well as to lower an input threshold to work with them.

Keywords: controlled natural language, ontological language, ontologies, knowledge engineering, knowledge base, knowledge representation, inference mechanism, ontology editor, multilingualism, semantics, translators

* Received 03 September 2019.

REFERENCES

1. Safwat H., Davis B., Zarrouk M. Engineering an aligned gold-standard corpus of human to machine oriented Controlled Natural Language. *2018 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI)*, Santiago, Chile, 2018, pp. 421–427. DOI: 10.1109/WI.2018.00-58.
2. Kuhn T. *Controlled English for knowledge representation*. Doctoral thesis. Zurich, 2010. 242 p.
3. Weichbroth P. Fluent editor and Controlled Natural Language in ontology development. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 2019, vol. 28, no. 4, p. 243.
4. Milov Yu.P. O standarte setevogo russkogo yazyka, ili Da zdravstvuet KRYa! [On the standards of the internet's Russian language, or Long Live Controlled Russian Language!]. *Informatsionnye resursy Rossii – Information Resources of Russia*, 2016, no. 3, pp. 40–41. (In Russian).
5. Toti D., Longhi A. SEMANTO: a graphical ontology management system for knowledge discovery. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1075–1084.
6. Khabarov V.I., Volegzhanina I.S. *Tsifrovye transformatsii v professional'nom obrazovanii (na primere podgotovki kadrov transporta)* [Digital transformations in vocational education (on the example of training transport personnel)]. Moscow, Rusains Publ., 2018. 210 p.
7. Tuzovskii A.F., Chirikov S.V., Yampol'skii V.Z. *Sistemy upravleniya znaniyami (metody i tekhnologii)* [Knowledge management systems]. Tomsk, NTL Publ. 2005. 258 p.
8. W3C OWL Working Group. *Web Ontology Language*. Available at: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/> (accessed 13.12.2019).
9. Gavrilova T.A., Khoroshevskii V.F. *Bazy znaniy intellektual'nykh sistem* [Knowledge bases of intelligent systems]. St. Petersburg, Piter Publ., 2000. 382 p.
10. Minsky M. *A framework for representing knowledge*. Cambridge, 1974 (Russ. ed.: Minskii M. *Freimyi dlya predstavleniya znaniy*. Moscow, Mir Publ., 1979. 151 p.).
11. Korobova I.L., comp. *Metody predstavleniya znaniy* [Methods of knowledge representation]. Tambov, Tambov State Technological University Publ., 2003. 24 p.
12. Luger G.F. *Artificial intelligence: structures and strategies for complex problem solving*. 4th ed. Harlow, England, New York, Pearson Education, 2002 (Russ. ed.: Lyuger Dzh.F. *Iskusstvennyi intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem*. 4th ed. Moscow, Williams Publ., 2005. 283 p.).
13. Hitzler P., Parsia B. Ontologies and rules. *Handbook on ontologies*. Ed. by S. Staab, R. Studer. Berlin, Springer, 2009, pp. 111–132.
14. Hu X., Dang D., Yao Y., Ye L. Natural language aggregate query over RDF data. *Information Sciences*, 2018, vol. 454–455, pp. 363–381.

Для цитирования:

Хабаров В.И., Степанов И.С., Серенко А.А. Контролируемый естественный язык для работы с онтологиями // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 99–120. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-99-120.

For citation:

Khabarov V.I., Stepanov I.S., Serenko A.A. Kontroliruemiyi estestvennyi yazyk dlya ra-boty s ontologiyami [Controlled natural language for ontology editing]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 99–120. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-99-120.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО–
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENTATION,
METROLOGY AND
INFORMATION–
MEASURING DEVICES
AND SYSTEMS

УДК 621.396.96

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-121-134

Алгоритм функционирования информационно-измерительной системы оценки координат беспилотных летательных аппаратов*

У.Р. НАИМОВ^а, С.Н. ДАНИЛОВ^б

3920, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, 106, Тамбовский государственный технический университет

^а umed87-88@mail.ru ^б plabz@mail.ru

Распространение использования беспилотных воздушных систем (БВС) в гражданских и военных операциях поставило множество проблем: от того, как обеспечить надежное слежение за беспилотным воздушным объектом, до того, как организовать и представить данные значимым образом. Концепции построения перспективных радиолокационных систем (РЛС) показывают, что это будут комплексы интегрального типа. Создание таких комплексов предполагает наличие в их составе информационной системы, состоящей из каналов, которые производят функционально завершённую процедуру обработки сигналов и информации в интересах решения конкретной задачи. Повышение качества обработки сигналов и информации (точности, помехоустойчивости, надёжности, целостности) в информационной системе возможно по двум взаимодополняющим друг друга направлениям. Первое – это совершенствование устройств и систем, входящих в состав радиоэлектронного комплекса, а также введение в его состав новых, имеющих более высокие характеристики качества функционирования. Второе – это разработка соответствующего алгоритмического обеспечения. В настоящее время в алгоритмах фильтрации обычная система РЛС использует модель, основанную на предположении, что сопровождаемая цель движется прямолинейно с постоянной скоростью. Если БПЛА не в состоянии маневрировать, то задача слежения решается просто – с помощью стандартных алгоритмов фильтрации. Тем не менее способность цели к маневрированию делает перечисленные алгоритмы неподходящий для точного слежения из-за несоответствия предполагаемой модели движения цели реальности.

Ключевые слова: фильтр, информационная система, маневр, функционирование, слежение, маневренность, быстродействующий фильтр, основной фильтр, неопределённость, стохастичность процессов, дестабилизирующие факторы, оптимальная оценка, низкая чувствительность

* Статья получена 14 сентября 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Из вышеизложенного вытекает необходимость иметь автоматическую систему слежения за воздушным объектом, состоящую из нескольких подсистем с различными структурами, назначение которых состоит в обеспечении работы в различных режимах при наличии естественных и организованных помех, возможных нарушений регулярного процесса сопровождения, резкого изменения поведения параметров сигнала вследствие непредвиденных причин.

Необходимость прогнозирования и отслеживания траектории движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) требует решать задачу беспрерывного высокоточного измерения их координат, в том числе и в условиях помех. Это возможно путем применения адаптивных следящих измерителей, в которых в зависимости от ситуации могут изменяться как структура систем, так и параметры следящих фильтров [1, 2].

Характерными особенностями указанной задачи и соответствующих следящих систем являются структурная неопределенность (необходимость смены структуры в случайные моменты времени) и стохастичность процессов в них. Обе эти особенности являются объективными характеристиками процесса функционирования сложных динамических систем, получивших название стохастических систем со сменой структуры в случайные моменты времени.

Пусть система слежения подвергается воздействию двух типов дестабилизирующих факторов: относительно медленных изменений отслеживаемых параметров и быстрых изменений [3].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей анализа переходных процессов является получение алгоритмов функционирования следящих систем, оптимальных в том или ином смысле. В общем случае оптимальными являются алгоритмы, обеспечивающие высокую точность и устойчивость следящих систем, а также их низкую чувствительность к изменению условий функционирования при наличии неопределенности в поведении динамической системы (ДС) [4].

В настоящее время при вторичной обработке радиолокационной информации широкое применение получают оптимальные алгоритмы оценивания, базирующиеся на дифференциальных или разностных уравнениях, полученных на основе методов фильтрации.

При отслеживании маневренного БПЛА наилучшими являются алгоритмы, обеспечивающие высокую точность оценивания параметров относительного движения БПЛА и устойчивость к срыву слежения, а также имеющие низкую чувствительность к изменению условий функционирования при наличии неопределенности в поведении ДС.

Исходные модели выбираются в соответствии с задачами, решаемыми системами слежения и возможностями современных цифровых вычислительных машин (ЦВМ) с точки зрения скорости и объема памяти. Модель состояния для каждого маршрута должна обеспечивать оптимальную оценку всех

необходимых фазовых координат для современных и перспективных методов наведения и выдачи команд для БПЛА [5].

Как отмечалось в [6], характерной особенностью существующих измерителей является низкий порядок устойчивости следящей системы и одно-контурный принцип ее построения, при котором чувствительный дискриминатор, пеленгатор, формирователь оценок и исполнительное устройство составляют единый контур. В такой системе слежения требования к точности, скорости и устойчивости противоречат друг другу. Следовательно, невозможно одновременно обеспечить высокие точности, скорость и надежность отслеживания на достаточном интервале времени, особенно при интенсивном изменении координат БПЛА.

Если БПЛА совершает маневр, в ходе которого возникают производные отслеживаемых координат, порядок которых превышает порядок астатизма следящей системы, то это приводит к нарастанию динамических ошибок сопровождения. В результате при длительном маневре неизбежным будет нарушение отслеживания, а соответственно и срыв наведения. Снижение влияния маневра цели за счет повышения усиления в контурных измерителях приводит к существенному снижению запаса устойчивости.

В связи с отмеченными особенностями существующих следящих измерителей решение задачи эффективного сопровождения беспилотников, особенно обладающих сверхманевренными свойствами, становится весьма проблематичным.

В техническом плане сверхманевренные БПЛА предъявляют существенно более жесткие требования к точности, быстродействию и устойчивости их сопровождения систем слежения как при слежении за одиночными целями, так и при одновременном сопровождении нескольких объектов.

Качественное улучшение маневренных свойств БПЛА дает возможность получения таких маневров, которые позволяют как ухудшать показатели систем сопровождения, реализуя так называемые алгоритмические воздействия, так и улучшать показатели своих радиолокационных систем наблюдения, содействуя системе траекторного управления наблюдением самого БПЛА.

Примером первого направления является целенаправленное выполнение маневра, при котором достаточно сильно проявляется третья и более высокие производные изменения дальности, скорости и угловых координат, приводящие к срыву сопровождения. Выполнение таких маневров, существенно расширяющих возможности уклонения от управляемых средств поражения, невозможно без алгоритмов оценивания в РЛС относительных ускорений и их производных. Возможность сброса скорости до околонулевых значений и зависание в воздухе также приводит к срыву сопровождения сверхманевренных БПЛА импульсно-доплеровскими РЛС противоположной стороны.

При решении задач сопровождения интенсивно маневрирующих воздушных целей модели состояния должны учитывать интенсивные изменения координаты в дальномерном канале, пеленгов в азимутальной и угломестной плоскости φ_r и φ_B соответственно, угловой скорости линии визирования в угломерном канале. Использование скоростей обусловлено необходимостью учета маневров цели в процессе слежения. Например, выполнение такого ма-

невра, при котором становятся существенными третьи и более высокие производные координат, значительно расширяет возможности сопровождения цели.

Рассмотрим кинематические уравнения для метода наведения в наимыгоднейшую упрежденную точку. Для упрощения рассмотрим эти уравнения только для горизонтальной плоскости. Геометрия взаимного перемещения БПЛА и РЛС в этой плоскости показана на рис. 1.

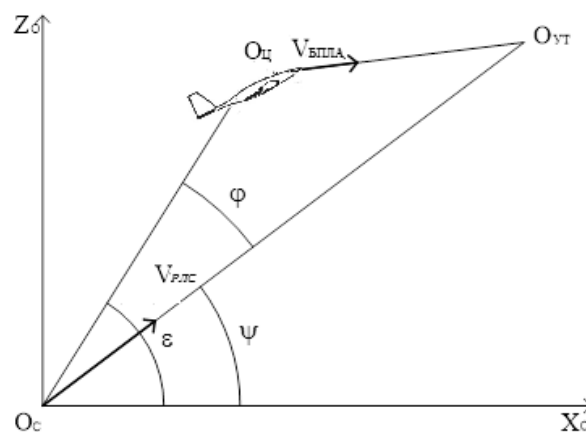


Рис. 1. Перемещения БПЛА и РЛС

Fig. 1. Movements of UAVs and RLS

На основе этого рисунка можно получить следующее выражение:

$$\varphi = \varepsilon - \psi, \quad (1)$$

где φ – пеленг БПЛА; ε – угловое положение линии визирования; ψ – курсовой угол РЛС.

Из выражения (1) следует, что

$$\dot{\varphi} = \omega_{\varphi} = \omega, \quad (2)$$

где ω_{φ} – угловая скорость изменения угла пеленга; $\omega = \dot{\varepsilon}$ – угловая скорость линии визирования.

При этом относительное движение БПЛА и РЛС определяется следующим уравнением кинематики [7]:

$$\dot{\omega} = -\frac{2V_{сб}}{D} \omega, \quad (3)$$

где D – дальность до цели; $V_{сб}$ – скорость сближения.

С учетом выражений (2) и (3) получим детерминированную часть модели состояния

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \omega, \\ \dot{\omega} = -\frac{2V_{сб}}{D} \omega. \end{cases} \quad (4)$$

В дискретной форме она будет иметь вид

$$\begin{cases} \varphi(k+1) = \varphi(k) + \omega(k)T, \\ \omega(k+1) = \left(1 - \frac{2V_{сб}(k)}{D(k)}T\right)\omega(k). \end{cases} \quad (5)$$

В матричной форме с учетом случайных воздействий модель состояния будет иметь вид

$$x(k+1) = \Phi^{(i)}(k) \cdot x(k) + \xi^{(i)}(k), \quad (6)$$

$$\Phi^{(i)}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & \left(1 - \frac{2V_{сб}(k)}{D(k)}T\right) \end{bmatrix},$$

где $x(k)$ – m -мерный вектор фазовых координат; $\xi^{(i)}(k)$ – последовательности статистически независимых между собой и во времени случайных величин с гауссовской плотностью вероятности.

Начальные измерители (формирователи наблюдения процесса) должны гарантировать формирование оценок и всех необходимых координат вектора состояния. Обоснованность действия этой гарантии можно проверить на основе критериев наблюдения. Из этой проверки следует, что в любой группе функционально связанных координат, подлежащих оцениванию, должны как минимум наблюдаться нулевые производные оцениваемых координат. В нашем случае это пеленги целей в горизонтальной и вертикальной плоскости, которые измеряются первичными измерителями РЛС.

Недостатком такой модели является, как уже говорилось, невозможность одновременно обеспечить точность и быстроту реагирования на изменение входного сигнала. Это хорошо видно на рис. 2, на котором изображена переходная характеристика такой следящей системы, где кривая 1 – входной сигнал в форме единичного скачка, кривая 2 – оценка входного сигнала, получаемая с помощью вышеописанного фильтра.

Из рисунка видно, что при достаточно высокой точности отслеживания наблюдаемого процесса в установившемся режиме скорость отработки быстроменяющегося входного сигнала невысока.

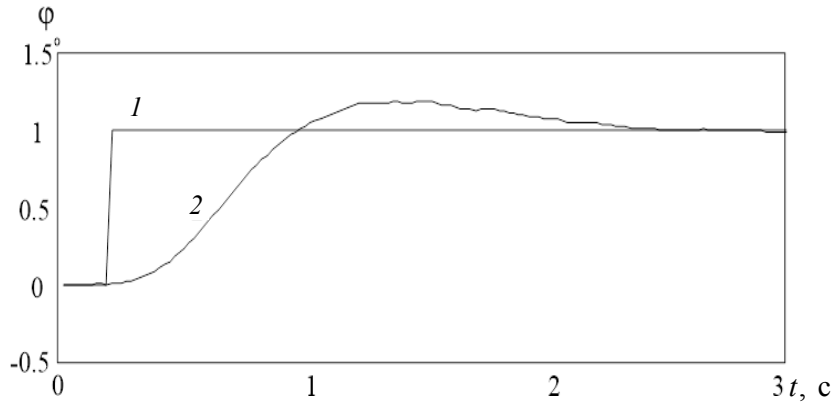


Рис. 2. Переходная характеристика для основной следящей системы

Fig. 2. A transient characteristic of the main tracking system

Это приводит к необходимости применения, в дополнение к модели (4), быстродействующего фильтра, который будет обеспечивать быструю отработку резкого изменения входного воздействия, возможно, и при меньшей точности.

Модель состояния для этого случая имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = -\hat{\omega}_{\psi} + \xi_j(k), \\ \dot{\omega} = -\frac{2V_{сб}}{D} \omega. \end{cases} \quad (7)$$

Существенным элементом модели (7) является только первое уравнение, но для формального согласования ее с моделью (4) при синтезе (сохранении размерности 2×1) сохранено второе уравнение.

В дискретной форме модель (7) будет иметь вид

$$\begin{cases} \varphi(k+1) = \varphi(k) - \hat{\omega}_{\psi}(k)T + \xi_j(k), \\ \omega(k+1) = \left(1 - \frac{2V_{сб}(k)}{D(k)}T\right)\omega(k). \end{cases} \quad (8)$$

В матричной форме модель (7) будет иметь вид

$$x(k+1) = \Phi^{(i)}(k) \cdot x(k) + \xi^{(i)}(k), \quad (9)$$

$$\Phi^{(i)}(k) = \Phi(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{2V_{сб}(k)}{D(k)}T\right) \end{bmatrix}.$$

На рис. 3, *а*, *б* изображены переходная характеристика $\varphi(t)$ следящей системы, синтезированной на основе модели (7), где линия 1 – входной сигнал в виде единичного скачка, линия 2 – оценка входного сигнала, получаемая с помощью вышеописанной следящей системы.

Хорошо видно (рис. 3, *а*), что такая следящая система быстро обрабатывает резкое изменение входного воздействия, но в то же время имеет большую установившуюся ошибку (рис. 3, *б*).

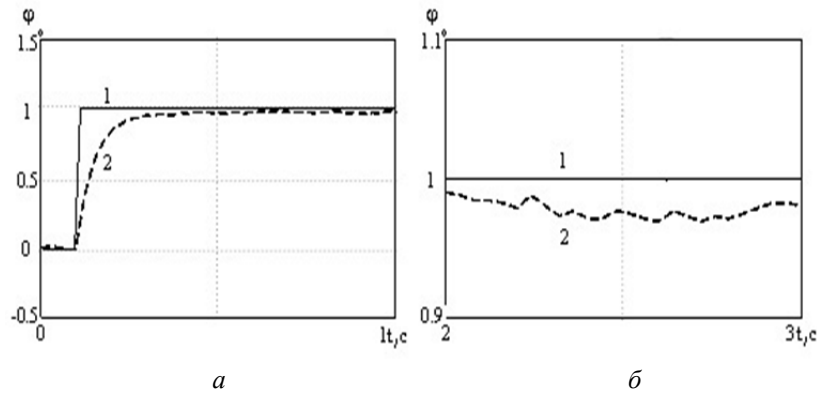


Рис. 3. Переходная характеристика для быстродействующей следящей системы

Fig. 3. A transient characteristic of the fast-acting tracking system

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Исходя из вышеизложенного для синтеза алгоритма функционирования системы автоматического сопровождения интенсивно маневрирующих воздушных целей в режиме обзора выбираем модель, состоящую из двух частей: фильтра, построенного на основе выражения (4), и быстродействующего фильтра на основе выражения (7). Окончательная оценка отслеживаемого параметра определяется на основе теории систем со случайной структурой. В соответствии с методом синтеза систем со случайной структурой получен алгоритм функционирования угломерного канала.

Оценки пеленга, угловой скорости линии визирования и нормального ускорения на выходе фильтра первой модели могут быть получены на основе следующих выражений:

$$\hat{\varphi}^{(1)}(k) = \hat{\varphi}^{(1)}(k-1) + \hat{\omega}^{(1)}(k-1)T + K^{(1)}(k-1)v^{(1)}(k-1); \quad (10)$$

$$\hat{\omega}^{(1)}(k) = \left(1 - \frac{2V_{сб}(k-1)}{D(k-1)}T\right) \hat{\omega}^{(1)}(k-1) + K^{(1)}(k-1)v^{(1)}(k-1); \quad (11)$$

соответствующие оценки для фильтра второй модели:

$$\hat{\varphi}^{(2)}(k) = \hat{\varphi}^{(2)}(k-1) - \hat{\omega}_{\psi}(k-1)T + K^{(2)}(k-1)v^{(2)}(k-1); \quad (12)$$

$$\hat{\omega}^{(2)}(k) = \left(1 - \frac{2V_{\text{сб}}(k-1)}{D(k-1)}T\right) \hat{\omega}^{(2)}(k-1) + K^{(2)}(k-1)v^{(2)}(k-1), \quad (13)$$

где v – невязки, вычисляются по формулам:

$$v^{(1)}(k) = z(k) - H\hat{x}^{(1)}(k/k-1); \quad (14)$$

$$v^{(2)}(k) = z(k) - H\hat{x}^{(2)}(k/k-1). \quad (15)$$

Априорная ковариационная матрица дисперсий ошибок определяется следующим образом:

– для первой модели:

$$\begin{aligned} P_{11}^{(1)}(k/k-1) &= P_{11}^{(1)}(k-1/k-1) + P_{12}^{(1)}(k-1/k-1)T + P_{21}^{(1)}(k-1/k-1)T + \\ &\quad + P_{22}^{(1)}(k-1/k-1)T^2; \\ P_{12}^{(1)}(k/k-1) &= \left(P_{12}^{(1)}(k-1/k-1) + P_{22}^{(1)}(k-1/k-1)T\right) \times \\ &\quad \times \left(1 - \frac{2V_{\text{сб}}(k-1)T}{D(k-1)}\right); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P_{21}^{(1)}(k/k-1) &= \left(P_{21}^{(1)}(k-1/k-1) + P_{22}^{(1)}(k-1/k-1)T\right) \times \\ &\quad \times \left(1 - \frac{2V_{\text{сб}}(k-1)T}{D(k-1)}\right); \end{aligned}$$

$$P_{22}^{(1)}(k/k-1) = P_{22}^{(1)}(k-1/k-1) \left(1 - \frac{2V_{\text{сб}}(k-1)T}{D(k-1)}\right)^2;$$

– для второй модели:

$$P_{11}^{(2)}(k/k-1) = P_{11}^{(2)}(k-1/k-1);$$

$$P_{12}^{(2)}(k/k-1) = P_{12}^{(2)}(k-1/k-1) \left(1 - \frac{2V_{\text{сб}}(k-1)T}{D(k-1)}\right);$$

$$P_{21}^{(2)}(k/k-1) = P_{21}^{(2)}(k-1/k-1) \left(1 - \frac{2V_{\text{сб}}(k-1)T}{D(k-1)}\right);$$

$$P_{22}^{(2)}(k/k-1) = P_{22}^{(2)}(k-1/k-1) \left(1 - \frac{2V_{\text{сб}}(k-1)T}{D(k-1)}\right)^2.$$

Далее определяем апостериорную ковариационную матрицу дисперсий ошибок:

– для первой модели:

$$\begin{aligned} P_{12}^{(1)}(k/k) &= P_{12}^{(1)}(k/k-1) - P_{12}^{(1)}(k/k-1)K_{11}^{(1)}(k); \\ P_{11}^{(1)}(k/k) &= P_{11}^{(1)}(k/k-1) - P_{11}^{(1)}(k/k-1)K_{11}^{(1)}(k); \\ P_{21}^{(1)}(k/k) &= P_{21}^{(1)}(k/k-1) - P_{11}^{(1)}(k/k-1)K_{21}^{(1)}(k); \\ P_{22}^{(1)}(k/k) &= P_{22}^{(1)}(k/k-1) - P_{12}^{(1)}(k/k-1)K_{21}^{(1)}(k); \end{aligned} \quad (17)$$

– для второй модели:

$$\begin{aligned} P_{11}^{(2)}(k/k) &= P_{11}^{(2)}(k/k-1) - P_{11}^{(2)}(k/k-1)K_{11}^{(2)}(k); \\ P_{12}^{(2)}(k/k) &= P_{12}^{(2)}(k/k-1) - P_{11}^{(2)}(k/k-1)K_{11}^{(2)}(k); \\ P_{21}^{(2)}(k/k) &= P_{21}^{(2)}(k/k-1) - P_{11}^{(2)}(k/k-1)K_{21}^{(2)}(k); \\ P_{22}^{(2)}(k/k) &= P_{22}^{(2)}(k/k-1) - P_{12}^{(2)}(k/k-1)K_{21}^{(2)}(k). \end{aligned} \quad (18)$$

Ковариационные матрицы одношагового предсказания вектора наблюдений:

– для первой модели:

$$V_{11}^{(1)}(k) = P_{11}^{(1)}(k/k-1) + \sigma_{\Phi}^2; \quad (19)$$

– для второй модели:

$$V_{11}^{(2)}(k) = P_{11}^{(2)}(k/k-1) + \sigma_{\Phi}^2. \quad (20)$$

Коэффициенты усиления фильтров:

– для первой модели:

$$\begin{aligned} K_{11}^{(1)}(k) &= 1; \\ K_{21}^{(1)}(k) &= \frac{P_{21}^{(1)}(k/k-1)}{P_{11}^{(1)}(k/k-1)}; \end{aligned} \quad (21)$$

– для второй модели:

$$\begin{aligned} K_{11}^{(2)}(k) &= 1; \\ K_{21}^{(2)}(k) &= \frac{P_{21}^{(2)}(k/k-1)}{P_{11}^{(2)}(k/k-1)}. \end{aligned} \quad (22)$$

Гауссовская плотность вероятности невязки находится по выражениям:
– для первой модели:

$$N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot |V^{(1)}|}} \exp\left\{-\frac{|v^{(1)}(k)|^2}{2 \cdot |V^{(1)}|}\right\}; \quad (23)$$

– для второй модели:

$$N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot |V^{(2)}|}} \exp\left\{-\frac{|v^{(2)}(k)|^2}{2 \cdot |V^{(2)}|}\right\}. \quad (24)$$

Вероятности номеров структуры системы:

$$\begin{aligned} W^{(1)}(k) &= \frac{\pi(\theta(k) = 1 | \theta(k-1) = 1) N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] W^{(1)}(k-1)}{U(k)} + \\ &+ \frac{\pi(\theta(k) = 1 | \theta(k-1) = 2) N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] W^{(2)}(k-1)}{U(k)}; \\ W^{(2)}(k) &= \frac{\pi(\theta(k) = 2 | \theta(k-1) = 1) N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] W^{(1)}(k-1)}{U(k)} + \\ &+ \frac{\pi(\theta(k) = 2 | \theta(k-1) = 2) N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] W^{(2)}(k-1)}{U(k)}, \end{aligned} \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} U(k) &= \pi(\theta(k) = 1 | \theta(k-1) = 1) N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] W^{(1)}(k-1) + \\ &+ \pi(\theta(k) = 1 | \theta(k-1) = 2) N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] W^{(2)}(k-1) + \\ &+ \pi(\theta(k) = 2 | \theta(k-1) = 1) N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] W^{(1)}(k-1) + \\ &+ \pi(\theta(k) = 2 | \theta(k-1) = 2) N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] W^{(2)}(k-1). \end{aligned} \quad (26)$$

Результирующая оценка угловых координат:

$$\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}^{(1)}(k) W^{(1)}(k) + \hat{\varphi}^{(2)}(k) W^{(2)}(k);$$

$$\hat{\omega}(k) = \hat{\omega}^{(1)}(k) W^{(1)}(k) + \hat{\omega}^{(2)}(k) W^{(2)}(k).$$

Структурная схема алгоритма функционирования следящей системы представлена на рис. 4.

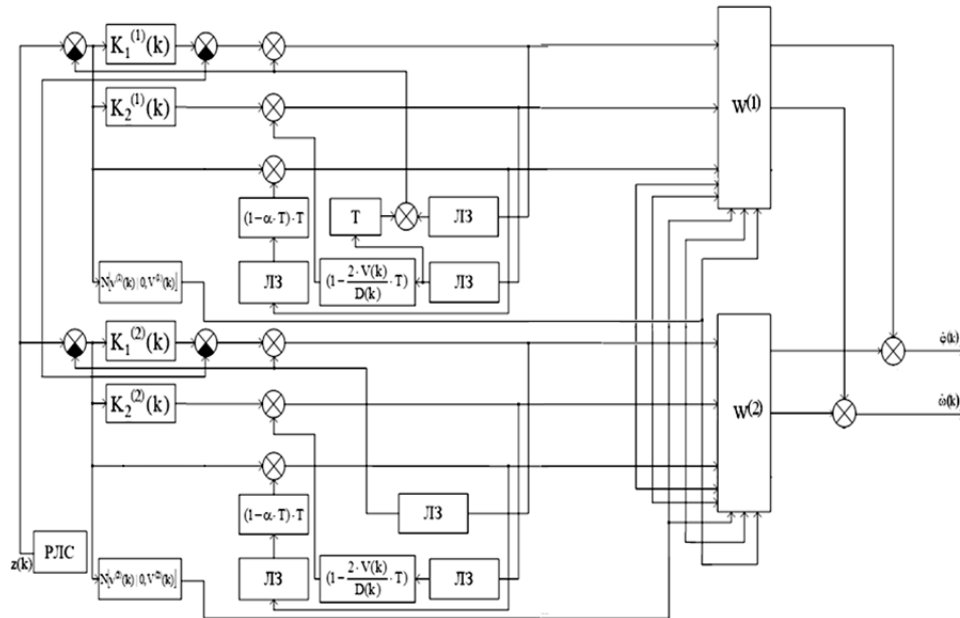


Рис. 4. Структурная схема алгоритма функционирования следящей системы

Fig. 4. A flow diagram of the tracking system functioning

Структура системы включает в себя два фильтра, вырабатывающих каждый свою парциальную оценку, и устройство весовой обработки, рассчитывающее общую оценку угловых координат.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Появление способности БПЛА к маневренному движению значительно повышает требования к следящим системам по точности и устойчивости их функционирования.

Это приводит к необходимости применения, в дополнение к модели (7), быстродействующего фильтра, который будет обеспечивать быструю обработку резкого изменения входного воздействия, возможно, и при меньшей точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция построения и структура перспективного информационно-измерительного комплекса / У.Р. Наимов, С.Н. Данилов, А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, Н.А. Кольтюков // Вестник ТГТУ. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 30–36. – DOI: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.030-036.
2. Пудовкин А.П., Данилов С.Н., Панасюк Ю.Н. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах: монография. – СПб.: Экспертные решения, 2014. – 256 с.

3. Бухалев В.А. Основы автоматики и теории управления. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2006. – 406 с.
4. Данилов С.Н., Пудовкин А.П., Шатовкин Р.Р. Алгоритм прогноза координат воздушных объектов для обеспечения функционирования системы направленной связи на основе систем со случайным изменением структуры // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 530–539.
5. Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П., Данилов С.Н. Алгоритм дальномерного канала с учетом информации бортовых датчиков воздушных судов // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 60–63.
6. Иванов А.В. Оценка влияния точности оценивания квазидальности на порог обнаружения приемных каналов спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника. – 2003. – № 5. – С. 66–69.
7. Меркулов В.И., Перов А.И., Саблин В.Н. Радиолокационные измерители дальности и скорости. Т. 1 / под ред. В.Н. Саблина. – М.: Радио и связь, 1999.
8. Наимов У.Р., Данилов С.Н., Пудовкин А.П. Синтез канала слежения за параметрами случайного процесса в условиях их скачкообразного изменения // Радиотехника. – 2019. – № 2. – С. 84–89.
9. Наимов У.Р. Оценивание координат беспилотного летательного аппарата на основе модели маневренного движения // Вестник ТГТУ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 236–240. – DOI: 10.17277/vestnik.2019.02.pp.236-240.
10. Максимов М.В., Горгонов Г.И. Радиозлектронные системы самонаведения: учебное пособие. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
11. Меркулов В.И. Алгоритмы наведения ракет воздух–поверхность при полуактивном синтезировании апертуры антенны // Радиотехника. – 2002. – № 1. – С. 48–52.
12. Авиационные системы радиуправления. Ч. 1 / под ред. В.И. Меркулова. – М.: Радио и связь, 1998.
13. Казаков И.Е., Артемьев В.М., Бухалев В.А. Анализ систем случайной структуры. – М.: Физматлит, 1993. – 272 с.
14. Герасимов Е.С., Домбровский В.В. Динамическая сетевая модель управления инвестиционным портфелем при случайном скачкообразном изменении волатильностей финансовых активов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 7. – С. 77–87.
15. Литцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов (нелинейная фильтрация и смежные вопросы). – М.: Наука, 1974. – 696 с.

Наимов Умеджан Розибекович, соискатель степени кандидата наук, Тамбовский государственный технический университет. Автор 14 научных работ. Область научных исследований – методы оптимизации радиолокационных следящих измерителей. E-mail: umed87-88@mail.ru

Данилов Станислав Николаевич, доктор технических наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет. Автор более 80 наименований научных работ, из них 8 изобретений. Область научных исследований – методы оптимизации радиолокационных следящих измерителей. E-mail: plabz@mail.ru

Naimov Umedjan Rozibekovich, a candidate for a PhD degree, Tambov State Technical University (FSBEI HE). He is the author of 14 publications. His field of research is methods of radar servo meters optimization. E-mail: umed87-88@mail.ru

Danilov Stanislav Nikolaevich, D.Sc. (Eng.), professor, Tambov State Technical University (FSBEI HE). He is the author of more than 80 publications including 8 inventions. His field of research is methods of radar servo meters optimization. E-mail: plabz@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-121-134

An algorithm for information-measuring system functioning to assess coordinates of unmanned aerial vehicles*U.R. NAIMOV^a, S.N. DANILOV^b

Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya Street, Tambov, 392000, Russian Federation

^a *umed87-88@mail.ru* ^b *plabz@mail.ru***Abstract**

A widespread use of unmanned aerial systems (UAV) in civilian and military operations posed many problems: beginning with how to ensure reliable tracking of an unmanned aerial object to how organize and present data in a meaningful way. The concepts for constructing promising radar systems (radar) show that these will be complexes of the integral type. The creation of such complexes implies the presence in their structure of an information system consisting of channels that produce a functionally completed procedure for processing signals and information to solve a specific problem. Improving the quality of signal and information processing (accuracy, noise immunity, reliability, and integrity) in the information system is possible in two mutually complementary directions. The first is the improvement of the devices and systems that make up the electronic complex, as well as the introduction of new ones with higher performance characteristics. The second is the development of appropriate algorithmic support.

Keywords: filter, information system, maneuver, functioning, tracking, maneuverability**REFERENCES**

1. Naimov U.R., Danilov S.N., Pudovkin A.P., Panasyuk Yu.N., Koltyukov N.A. Kontsepsiya postroeniya i struktura perspektivnogo informatsionno-izmeritel'nogo kompleksa [The concept of construction and structure of a promising radio-electronic complex]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 30–36. DOI: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.030-036.
2. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnye metody obrabotki informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Promising methods of information processing in radio engineering systems]. St. Petersburg, Ekspertnye resheniya Publ., 2014. 256 p.
3. Bukhalev V.A. *Osnovy avtomatiki i teorii upravleniya* [Fundamentals of automation and control theory]. Moscow, Zhukovsky Air Force Engineering Academy Publ., 2006. 406 p.
4. Danilov S.N., Pudovkin A.P., Shatovkin R.R. Algoritm prognoza koordinat vozdukhnykh ob"ektov dlya obespecheniya funktsionirovaniya sistemy napravlennoi svyazi na osnove sistem so sluchainym izmeneniyem struktury [Algorithm of forecasting air objects coordinates for maintenance directed communication system band on systems with random change of structure]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 3, pp. 530–539.
5. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P., Danilov S.N. Algoritm dal'nomernogo kanala s uchetom informatsii bortovykh datchikov vozdukhnykh sudov [The algorithm ranging channel in view of the information onboard sensors aircraft]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2013, no. 9, pp. 60–63.
6. Ivanov A.V. Otsenka vliyaniya tochnosti otsenivaniya kvazidal'nosti na porog obnaruzheniya priemnykh kanalov sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem [Evaluation of the effect of quasidality estimation accuracy on the detection threshold of receiving channels of satellite radio navigation systems]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2003, no. 5, pp. 66–69.
7. Merkulov V.I., Perov A.I., Sablin V.N. *Radiolokatsionnye izmeriteli dal'nosti i skorosti*. T. 1 [Radar distance and speed meters. Vol. 1]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1999.

* Received 14 September 2019.

8. Naimov U.R., Danilov S.N., Pudovkin A.P. Sintez kanala slezheniya za parametrami sluchainogo protsessa v usloviyakh ikh skachkoobraznogo izmeneniya [Synthesis of a tracking channel for parameters of a random process under conditions of their abrupt change]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2019, no. 2, pp. 84–89.

9. Naimov U.R. Otsenivanie koordinat bespilotnogo letatel'nogo apparata na osnove modeli manevrennogo dvizheniya [Estimation of the coordinates of an unmanned aerial vehicle based on a model of maneuverable movement]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 236–240. DOI: 10.17277/vestnik.2019.02.pp.236-240.

10. Maksimov M.V., Gorgonov G.I. *Radioelektronnye sistemy samonavedeniya* [Radio-electronic homing systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 304 p.

11. Merkulov V.I. Algoritmy navedeniya raket vozdukh-poverkhnost' pri poluaktivnom sintezirovani apertury anteny [Air-to-surface missile guidance algorithms for semi-active synthesis of the antenna aperture]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2002, no. 1, pp. 48–52.

12. Merkulov V.I., ed. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniya* [Aviation radio control systems. Pt. 1]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1998.

13. Kazakov I.E., Artemiev V.M., Bukhalev V.A. *Analiz sistem sluchainoi struktury* [Analysis of systems with random structure]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1993. 272 p.

14. Gerasimov E.S., Dombrovskii V.V. Dinamicheskaya setevaya model' upravleniya investitsionnym portfelem pri sluchainom skachkoobraznom izmenenii volatil'nostei finansovykh aktivov [Dynamic network model of managing investment portfolio under random stepwise changes in volatilities of financial assets]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2003, no. 7, pp. 77–86. (In Russian).

15. Liptser R.Sh., Shiryaev A.N. *Statistika sluchainykh protsessov (nelineinaya fil'tratsiya i smezhnye voprosy)* [Statistics of random processes (non-linear filtering and related issues)]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 696 p.

Для цитирования:

Наимов У.П., Данилов С.Н. Алгоритм функционирования информационно-измерительной системы оценки координат беспилотных летательных аппаратов // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 4 (77). – С. 121–134. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-121-134.

For citation:

Naimov U.R., Danilov S.N. Algoritm funktsionirovaniya informatsionno-izmeritel'noi sistemy otsenki koordinat bespilotnykh letatel'nykh apparatov [An algorithm for information-measuring system functioning to assess coordinates of unmanned aerial vehicles]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 4 (77), pp. 121–134. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-121-134.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENTATION,
METROLOGY AND
INFORMATION-
MEASURING DEVICES
AND SYSTEMS

УДК 519.24

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-135-146

The analysis of the formant method of speech intelligibility estimation as a method of performing indirect measurements^{*}

V.A. TRUSHIN

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

rastr89@mail.ru

Abstract

The paper considers the formant method proposed by N.V. Pokrovsky for determining speech intelligibility. Its essence, algorithmic and technical realization based on the information-measuring approach, as a method of making indirect measurements is analyzed. It is proposed to form a test acoustic effect based on a unified speech-like signal from syllabic or verbal articulation tables. The results of experimental studies of the synthesis of such signals, their energy spectra and probability density distribution are presented. The issues of error estimation in speech intelligibility determination are discussed: the concept of errors for different applications, an error of indirect measurements, and a theoretical error due to the conformity degree of the adopted model of speech intelligibility measurement (estimation) to the real object that is a human hearing aid. Based on the analysis of the results of the peripheral auditory system studies it is concluded that it is necessary to revise the adopted model of speech intelligibility estimation. In conclusion, the critique of the formant approach to the assessment of speech intelligibility and suggestions for their improvement are given. Based on the analysis of the results of the peripheral auditory system studies, an information-measuring model that reflects the functioning of the external ear, eardrum, and basilar membrane more adequately is proposed. The conclusion is drawn that it is necessary to revise the existing model for assessing speech intelligibility, in particular, the criteria for the reliability of its assessment, the model of the test signal and the measurement procedure.

Keywords: speech intelligibility, formant method, articulation tests, method of measurements, intelligibility estimation error, theoretical error, transverse filter, frequency response unevenness, amplitude compression

^{*} Received 16 August 2019.

INTRODUCTION

The definition of speech intelligibility is necessary in many areas: building acoustics, medicine, psychoacoustics, speech communication systems, problems of protecting speech information, etc. To determine speech intelligibility, a lot of different methods which can be divided into two large groups: subjective (expert) and objective methods are used.

Subjective (expert) methods are based on articulation tests involving teams of speakers and listeners using articulation tables of speech elements: syllables, words, and phrases. There are quite a few varieties of articulation methods for determining speech intelligibility. In Russia, they are regulated by the standards GOST R 50840-95 [1] and GOST 16600-72 [2]. A review of foreign methods is quite fully reflected in [3, 4].

Objective methods for assessing intelligibility are based on measuring the objective parameters of a speech signal, while speakers and listeners are “replaced” by technical devices that to some extent model real speech pathways and human hearing organs (for example, an artificial voice, an artificial ear) [5].

Objective methods are divided into two large groups: formant (additive) and modulation methods. Among the formant methods, we can distinguish methods proposed by N. Pokrovsky [5], Y. Bykova [6], M. Sapozhkova [7], as well as foreign methods such as AI, SII, % ALcons and others [3, 4]. Modulation methods include STI and RASTI [3, 4]. In Russia, formant methods are based on the theory of additive contribution of various frequency lanes to total formant intelligibility. Differences between individual methods are caused by the fact that various characteristics of speech and forms of their interdependencies are selected, while the N.V. Pokrovsky method is widely used, the essence of which is described below:

- The entire frequency range of speech is divided into n -bands (in the general case n -arbitrary bands), for example, equal-articulating, octave, etc.
- For each i -th frequency band, its contribution g_i is determined to the total intelligibility of A_f formants; this contribution is estimated from the so-called formant distribution $A_f(f)$ which, in fact, is the distribution function of the formant occurrence probability in frequency (because human perception of formants has the additivity property $\sum g_i = 1$).

If the listener knowingly accepted everything that the speaker conveys, i.e. if there were an ideal channel (the source of speech information is a receiver), then regardless of the number of bands and their width, formant intelligibility would be 1. However, in real conditions, a part of the formants is not perceived for a number of reasons such as an insufficient volume, distortions in the path, noises, interference, etc., therefore we always have $A_f \leq 1$. This circumstance is taken into account by the formant perception coefficient P ; in fact, P is the probability of the correct reception of formants $0 \leq P \leq 1$.

The perception coefficient is a function of the sensation level of formants, i.e. the number of formants whose intensity is above a certain threshold value.

For most practical cases, the level of sensation E_i is determined by the formula:

$$E_i = B_{fi} - B_{ni} = (B_{si} - B_{ni}) - \Delta B_i, \quad (1)$$

where B_{si} , B_{fi} , B_{ni} are, spectral levels of speech, formant, and noise respectively in the i -th frequency band; ΔB_i is the difference between the speech spectrum and formants.

Thus, total formant intelligibility is determined by the expression:

$$A_i = \sum_{i=1}^n A_{fi} = \sum_{i=1}^n g_i P_i. \quad (2)$$

Next, the transition from a formant to any other types of intelligibility (D , S , W , I) is carried out according to the dependencies known for a certain language [5, 9].

The use of this method for solving specific practical problems is regulated by appropriate methods; for example, GOST 8031 is used for assessing the quality of communication paths [8]; the methodology proposed in [9] is used for assessing the security of speech information from leakage through technical channels.

1. THE N.V. POKROVSKY FORMANT METHOD AS A METHOD FOR TAKING MEASUREMENTS

Essentially, these methods are indirect measurement methods in which the final measurement goal is obtained based on direct measurements of certain quantities and the known (accepted) dependencies of these quantities for the purpose of measurement. In this case, we mean direct measurements of noise levels and signal levels + noise” i in the received frequency bands f_i . Then, the levels B_{si} , the ratios (signal / noise) i , the sensation levels of the formants E_i , the perception coefficient p_i , the formant intelligibility A_f and the transition according to the known dependencies on the A_{fs} verbal intelligibility W [5, 9] are calculated.

Strictly speaking, it is more correct to speak about evaluation, not about measurement, because the measured value – intelligibility – is dimensionless, but this does not change the essence.

Below is a generalized structural diagram of the implementation of the N.V. Pokrovsky method based on an analog sound level meter [10] (Fig. 1). This diagram is called generalized, because it will be “filled” with various specifics for various applications. Therefore, for the tasks of assessing the security of speech information from leakage through technical channels, measuring microphones and accelerometers are used as primary converters; seven-octave filters with center frequencies of 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000.8000 Hz, etc. are used.

As is known, the measurement procedure (method) is a set of specifically described operations, the implementation of which ensures the receipt of measurement results with established accuracy indicators [11].

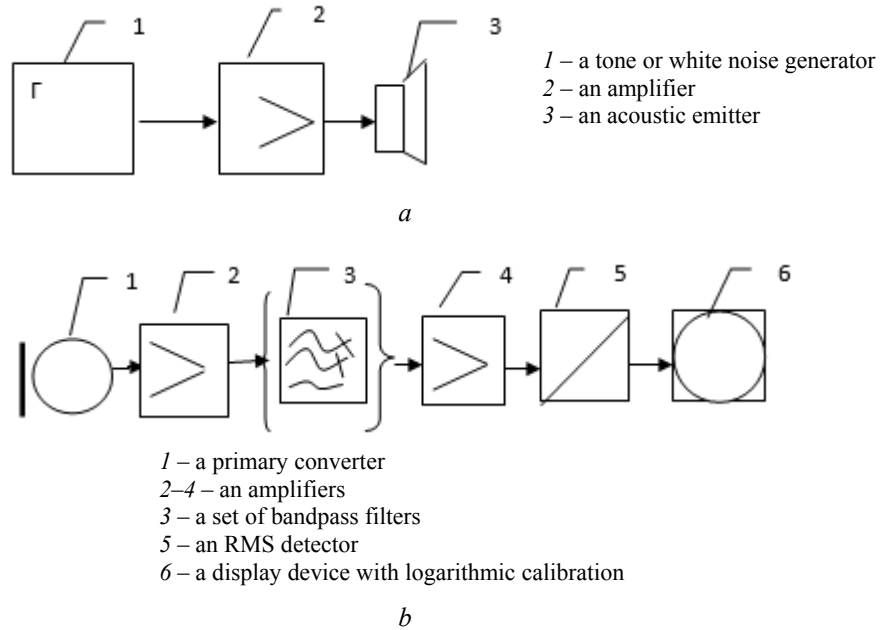


Fig. 1. A generalized block diagram of formant method implementation:
a – a test signal generation device; b – measuring part

Рис. 1. Обобщенная структурная схема реализации формантного метода:
a – устройство формирования тестового сигнала; б – измерительная часть

According to this formulation and Fig. 1 in the N.V. Pokrovsky formant method the following operations are implemented:

1. Conversion of an acoustic pressure into an equivalent electrical signal (primary transducers).
2. Linear amplification of the electrical signal (amplifiers).
3. Band-pass filtering in octave, third-octave or equal-articulation bands (a set of band-pass filters).
4. Converting the “filtered” signals into average values of their squares (intensity) I_i .
5. A logarithm of the obtained values.

Thus, at the output of the measuring part, a set of values of spectral noise and “signal + noise” levels is formed in each frequency band:

$$B_{ni} = 10 \lg \frac{I_{ni}}{10} B_{s+n} = 10 \lg \frac{I_{(s+n)i}}{I_0}, \quad (3)$$

where

$$I_i = \int_0^T p^2(t, fi) dt. \quad (4)$$

Then, computational operations are carried out to determine the formant intelligibility of A_f and the transition to verbal intelligibility in accordance with the known dependencies [5, 9].

2. THE TEST SIGNAL MODEL

In the adopted technique, either tonal signals corresponding to the middle of the octave bands are used as a test signal (Fig. 1), or a white noise with a normal probability distribution of values is used.

Such an approximation, apparently, is possible when dividing the frequency range into a large number of bands (for example, equally articulatory), which is known as completely inadequate to the real speech signal.

The most natural is the use of pre-recorded real speech signals with a duration of at least the planned time of negotiations; ideally, the voices of the “owners” of the protected premises (for the tasks of protecting information.). However, this approach does not allow certification (if necessary) of such UFTS. In this regard, a unified approach to creating a test signal, in particular formed on the basis of syllabic or verbal tables seems appropriate in accordance with GOST [1, 2]. As an example of such test signals, Fig. 2 and 3 show some results of experimental studies carried out under the guidance and with the participation of the author [12].

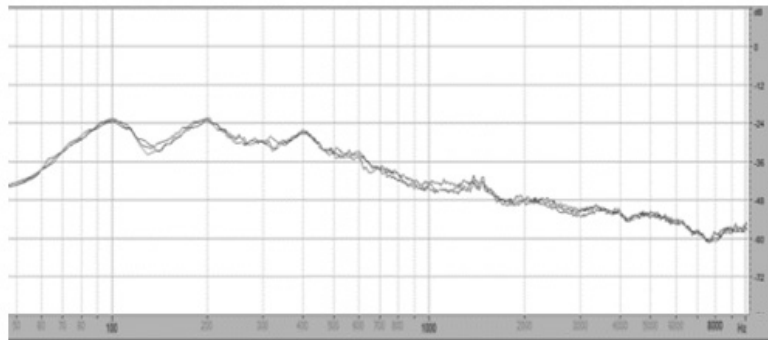
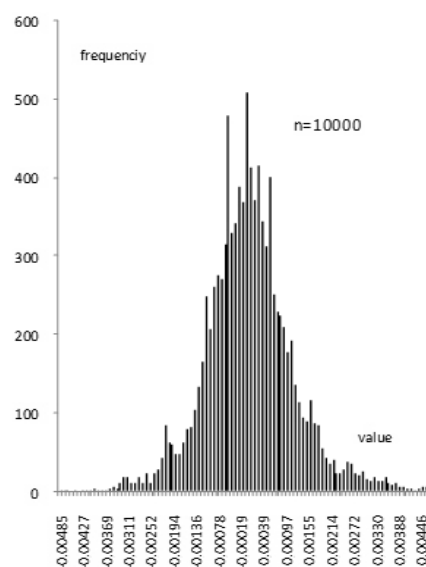


Fig. 2. The energy spectra of a speech choir based on syllables, words, and connected texts (two male voices and one female)

Рис. 2. Энергетические спектры речевого хора на основе слогов, слов и связных текстов (два мужских голоса и один женский)

Fig. 3. The frequency histogram constructed on 10 000 values of a “word” signal

Рис. 3. Частотная гистограмма, построенная по 10 000 значений сигнала «слова»



It can be seen from the figure that the spectra obtained practically coincide and correspond to the average spectrum of Russian speech.

An important statistical characteristic of speech is also the probability distribution density of its values, which is most often approximated by Laplace distributions (double exponential) or a third-order polynomial in a system of exponential functions [13, 14]. Figure 2 shows an experimental probability density of the RP signal (syllables) values, constructed from 10,000 reports with a sampling frequency of 44 kHz. Visual resemblance to the Laplace distribution is obvious.

3. ON ERRORS OF INTELLIGIBILITY ASSESSMENT

From the point of view of information-measuring technologies, the application of the N.V. Pokrovsky formant method and methods that implement it raises a number of questions, and especially the following ones.

1. In accordance with the definition of the term “measurement technique” [17], what will an estimation error W be and what should it be?

2. The degree of conformity of the measurement methodology used to the real object due to the accepted assumptions and simplifications (a theoretical error).

The answers to these questions, of course, require a separate detailed discussion, but in general terms they can be formulated as follows.

As you know, a measurement error is understood to mean the deviation of the measured value of a quantity from its true value. In practice, of course, instead of a true value (which is unknown), an actual value of the measured quantity, i.e. obtained with a higher accuracy is used. Obviously, only the result of properly organized, representative articulation tests can be taken as a real value of W , since the very concept of W has an exclusively expert meaning. Depending on practical applications and goals of articulation tests, they should be organized in different ways. So, to assess speech intelligibility in auditoriums (concert, theater, or cinema halls) according to GOST 25902-83 [8], syllabic speech intelligibility is estimated with gradation in 3 classes:

I. Excellent intelligibility (over 90 %), II. Good intelligibility (80-90 %), III. Satisfactory intelligibility (70...80 %). In this case, spatial curves of equal intelligibility are constructed. To assess speech intelligibility in information protection tasks (assessment of the security of speech information from leakage through technical channels), W is used with the following gradations [9, 15]:

– concealment of negotiation facts in the allocated premises, with W being no more than 10 %;

– hiding the negotiation subject, with $W \leq 20$ %;

– hiding the negotiation content with $W \leq 30$ %;

– an impossibility of compiling a brief summary-annotation of the negotiation content, with $W \leq 40$ %.

– an impossibility of drawing up a detailed certificate of the negotiation content, with $W \leq 60$ %.

Obviously, the inaccuracy of the intelligibility assessment in the first case can lead to a change in class and, consequently, a comfortable perception by listeners. In the second case, errors in the estimation of W can lead to a speech information leakage with a wide variety of consequences. However it can be seen from the foregoing that a required error in the assessment of intelligibility is of the order of percentage units in the first case for syllabic intelligibility with its high values (0.7...0.9), and in the second case for verbal intelligibility with its rather small values (0.1...0.5).

The N.V. Pokrovsky concept of equally accurate measurements, i.e. actually “tied” to the accuracy of formant intelligibility is introduced.

“If measurements of any kind are equally accurate, independent and free from systematic errors and gross errors, then the number of measurements n for a given absolute error ε is determined by the dependence that is valid for each type” [5, p. 99]

$$n = f\left(\frac{\varepsilon}{r}\right), \quad (5)$$

where “ r ” is a standard deviation.

In this case, a single measurement is a table, i.e. n is a number of tables to be transmitted along the communication path.

Now let us consider the “measured”, i.e. obtained using the above methodology, value of W and the diagram that implements it (Fig. 1).

The instrumental component of the estimation error W is determined by the metrological characteristics of the technical equipment used, as shown in Fig. 1, the requirements for which are obvious from the general provisions of information-measuring technologies. A methodological error of the estimation of W is determined according to the recommendation of MI 2083-90 [18]. A methodological error in determining W was estimated in [17, 18]. It is shown that an absolute error of indirect measurements of W can be 0.07, and a relative error is 0.35.

4. ON THE ORGANIZATION OF ARTICULATORY TESTS

Regarding the organization of articulation tests, it is important to note the following circumstance. Research conducted by N.B. Pokrovsky was primarily associated with assessing the quality of means and communication channels to obtain their objective characteristics. For this, it is extremely important that the actuation tables are not correlated (sounds, syllables, words), while in a number of practical applications (for example, in information protection tasks) negotiations and conversations i.e. connected, meaningful “texts” take place. You can restore a missed word by context, and if it is possible to record conversations, listen to them repeatedly and filter, in this case intelligibility is significantly increased (the use of modern noise reduction methods increases the signal-to-noise ratio to 8 dB depending on the frequency band) [15]. Therefore, articulation tests with coherent texts [18] should be conducted for these purposes.

5. ON CONFORMITY OF THE ACCEPTED MEASUREMENT MODEL TO A REAL OBJECT

Obviously, a human hearing system, a degree of compliance with which should be evaluated is a real object. Studies of human hearing organs have been conducted for more than a century, and many articles, monographs, patents, and dissertations have been devoted to them. Nevertheless, a number of conclusions can be singled out that are directly related to the issue under consideration. As you know, the peripheral part of the human auditory system consists of the outer, middle and inner ear.

The outer ear organs (the auricle and the external auditory canal) perform the functions of perception and amplification of sound waves, but also have their own resonant frequencies in the region of 3...4 kHz with a gain of 10–12 dB [20, 21].

The eardrum is located at an angle to the ear canal and has asymmetric elasticity, which leads, according to the Helmholtz theory, to the formation of combination frequencies. In addition, “the presence of a special mechanism controlling the sensitivity of the ear in the form of a muscle stretching the eardrum” [20–22]

weakens a high level of sound pressure by 10...30 dB depending on the frequency, i.e. protects the ear from overload. At the same time, it is generally accepted that transformations in the outer and middle ear are linear up to sound pressure levels of the order of 80 dB [4, 22, 23], and nonlinearities appear only in the inner ear.

At the same time, in a number of papers opposite opinions are expressed about the place of occurrence of nonlinearities. Therefore, their occurrence in structures preceding the filtration mechanism is described, with the form of nonlinearity being a logarithmic or cubic root [22].

Modern methods of non-contact measurements of displacements of the nanometer range have revealed a logarithmic dependence of the movements of the eardrum (in particular in the Umbo region) on the sound pressure amplitude on its outer side in the range of ultrasound of 30...80 dB. In this case, the displacement reaches 60...250 nanometers depending on the frequency [24, 25].

Filtration of speech signals in the cochlea of the inner ear is carried out by not octave or equiarticulatory etc. bands, but by critical bands, the number of which is 24 [4]. In addition, band-pass filtering is carried out in a tonotopic mode (frequencies are "tied" to a specific location on the basilar membrane) from high-frequency to low-frequency; this explains a greater masking effect of the high-frequency part of the low-frequency spectrum. Apparently, the closest analogue to such a filter is transversal [26], which agrees well with G. Bekesy's traveling wave theory. In addition, the presence of nonlinear compression on the basilar membrane carried out by external hair cells is considered a fact [4, 21, and 23].

An analysis of papers devoted to studies of the peripheral auditory system, presented in a concise form, allows us to conclude that the accepted measurement model does not correspond to real processes in the human auditory system and to propose a more adequate model (Fig. 4).

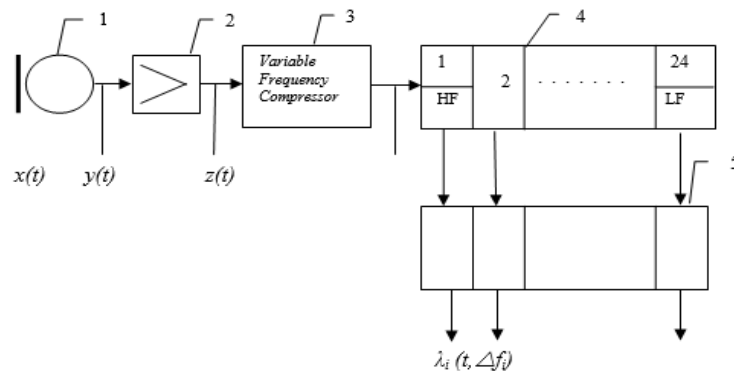


Fig. 4. A model of peripheral auditory information system for intelligibility measurements:

1 – a primary converter; 2 – an amplifier with an uneven frequency response (rise by 12...15 dB in the region of 3...4 kHz); 3 – a frequency-dependent amplitude compressor (a quasi-logarithmic or cubic root); 4 – a transverse filter with bands corresponding to critical hearing bands; 5 – an integrator

Рис. 4. Информационно-измерительная модель периферической слуховой системы для определения разборчивости:

1 – первичный преобразователь; 2 – усилитель с неравномерной АЧХ (подъем на 12...15 дБ в районе 3...4 кГц); 3 – частотозависимый амплитудный компрессор (квазилогарифмический или корень кубический); 4 – трансверсальный фильтр с полосами, соответствующими критическим полосам слуха; 5 – интегратор

In Fig. 4 $y(t) = k_1 f x(t)$; $z(t) = k_2 f F[y(t)]$, $\lambda_i = \int z(t, \Delta f_i) dt$, where F is the compression function.

The proposed model, of course, requires experimental validation and determination of its numerical parameters.

CONCLUSION

Quite a number of publications have been devoted to criticizing formant methods for assessing speech intelligibility, the results of which are reflected in the most generalized form in [27, 28, and 29]. The above analysis allows us to draw the following conclusions:

- results of correctly organized representative articulation tests (with coherent texts taking into account the effect of speech forcing, etc.) should be used as criteria for the reliability of speech intelligibility assessments;
- test signals should take into account real processes of speech formation;
- measurement methods should be based on an adequate model of auditory perception.

REFERENCES

1. *GOST R 50840–95. Peredacha rechi po traktam svyazi. Metody otsenki kachestva, razborchivosti i uznavaemosti* [State Standard R 50840–95. Speech transmission over varies communication channels. Techniques for measurements of speech quality, intelligibility and voice identification]. Moscow, Gosstandart Rossii Publ., 1996. 229 p.
2. *GOST 16600–72. Peredacha rechi po traktam radiotelefonnoi linii. Trebovaniya k razborchivosti rechi i metody artikulyatsionnykh ispytaniy* [State Standard 16600–72. Speech transmission over the radiocommunication. Requirements for speech legibility and methods of articulation measurements]. Moscow, Standards Publ., 1972. 90 p.
3. Rashevskii Ya.I., Kargashin V.L. Obzor zarubezhnykh metodov opredeleniya razborchivosti rechi [Review of foreign methods for determining speech intelligibility]. *Spetsial'naya tekhnika – Special Equipment*, 2002, no. 4, pp. 37–46.
4. Aldoshina I.A., Pritts R. *Muzykal'naya akustika* [Musical acoustics]. St. Petersburg, Kompozitor Publ., 2006. 760 p. (In Russian).
5. Pokrovsky N.B. *Raschet i izmerenie razborchivosti rechi* [Calculation and measurement of speech intelligibility]. Moscow, Svyaz'izdat Publ., 1962. 392 p.
6. Bykov Yu.S. *Teoriya razborchivosti rechi i povysheniya effektivnosti radiotelefonnoi svyazi* [Theory of legibility and increasing the effectiveness of radiotelephone communications]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1959. 351 p.
7. Sapozhkov M.A. *Rechevoi signal v kibernetike i svyazi* [The speech signal in cybernetics and communications]. Moscow, Svyaz'izdat Publ., 1963. 452 p.
8. *GOST 25902–83. Zritel'nye zaly. Metod opredeleniya razborchivosti rechi* [State Standard 25902-83. Auditoria. Speech intelligibility determination method]. Moscow, Standards Publ., 1984. 10 p.
9. Zheleznyak V.K., Makarov Yu.K., Khorev A.A. Nekotorye metodicheskie podkhody k otsenke effektivnosti zashchity rechevoi informatsii [Some methodological approaches to assessing the effectiveness of voice information protection]. *Spetsial'naya tekhnika – Special Equipment*, 2000, no. 4, pp. 39–45.
10. *GOST 17187–2010. Shumomery. Ch. 1. Tekhnicheskie trebovaniya* [State Standard 17187–2010. Sound level meters. Part 1. Technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 31 p.
11. *GOST 8.563–2009. Metodiki (metody) izmerenii* [State Standard 8.563-2009. Procedures of measurements]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 15 p.
12. Trushin V.A., Khitsenko V.E. About the methods of forming a test signal in the instrumental evaluation of speaker clearance. *2019 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, 2019.

13. Vykhodets V., ed. *Spravochnik po radioveshchaniyu* [Handbook to broadcasting]. Kiev, Tekhnika Publ., 1981.
14. Kropotov Yu.A. Model' odnomernoi plotnosti veroyatnosti rechevykh signalov [Model-dimensional probability density function of the speech signal]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti – Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 4, pp. 158–170.
15. Dvoryankin S.V., Makarov Yu.K., Khorev A.A. Obosnovanie kriteriev effektivnosti zashchity rechevoi informatsii ot utechki po tekhnicheskim kanalams [Substantiation of criteria for the effectiveness of protection of speech information from leakage through technical channels]. *Zashchita informatsii. Insaid*, 2007, no. 2, pp. 18–25. (In Russian).
16. Kozlachkov S.B., Dvoryankin S.V., Bonch-Bruevich A.M. Printsipy formirovaniya testovykh rechevykh signalov pri otsenkakh effektivnosti tekhnologii shumoochistki [Principles of forming test speech signals in assessing the efficiency of noise reduction technologies]. *Voprosy kiberneticheskoy bezopasnosti – Cybersecurity issues*, 2018, no. 3 (27), pp. 9–16.
17. *MI 2083–90. Izmereniya kosvennye. Opredelenie rezul'tatov izmerenii i otsenka ikh pogreshnostei* [Recommendations about metrology 2083–90. Indirect measurements. Determination of measurement results and assessment of their errors]. Moscow, Standartinform Publ., 1991. 9 p.
18. Trushin V.A., Ivanov A.V., Reva I.L. O metodicheskikh pogreshnostyakh otsenki slovesnoi razborchivosti rechi v zadachakh zashchity informatsii [On the methodological errors in evaluating verbal speech intelligibility in information protection problems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, no. 1 (25), pt. 2, pp. 180–185.
19. Trushin V.A., Ivanov A.V., Khitsenko V.E. O vybore modeli testovogo signala pri otsenke zashchishchennosti rechevoi informatsii ot utechki po tekhnicheskim kanalams [On the selection of a test signal model for assessing the protection of speech information from leakage through technical channels]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2015, no. 3, pp. 122–133.
20. Schiffman H.R. *Sensation and perception: an integrated approach*. New York, Wiley, 2001 (Russ. ed.: Shiffman Kh.R. *Oshchushchenie i vospriyatie*. 5th ed. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. 928 p.).
21. Altman Ya.A., Tavartkiladze G.A. *Rukovodstvo po audiologii* [Handbook on audiology]. Moscow, DMK-Press Publ., 2003. 360 p.
22. Labutin V.K., Molchanov A.P. *Modeli mekhanizmov slukha* [Models of hearing mechanisms]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 200 p.
23. Chistovich L.A., Ventsov A.V., Granstrem M.P. et al. *Fiziologiya rechi. Vospriyatie rechi chelovekom* [Physiology of Speech. The perception of speech by a person]. Leningrad, Nauka Publ., 1976. 388 p.
24. Mareev G.O. *Vozmozhnosti lazernogo avtodinnogo izmeritelya nanosmeshchenii v diagnostike zabolevaniy ukha*. Avtoref. diss. dokt. med. nauk [Possibilities of a laser autodyne measuring device of nanodisplacements in the diagnosis of ear diseases. Author's abstract of Dr. medical sci. diss.]. Saratov, 2013. 22 p.
25. Usanov D.A., Mareev O.V., Skripal' A.V., Mareev G.O. Lazernye avtodinnye izmereniya parametrov dvizheniya barabannoi pereponki [Laser autodyne measurements of the parameters of the movement of the eardrum]. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki – Russian Journal of Biomechanics*, 2012, vol. 16, no. 1, pp. 8–21. (In Russian).
26. Vargin P.S. *Matematicheskaya model' ulitki vnutrennego ukha* [Mathematical model of the cochlea of the inner ear]. Available at: <http://www.telenavt.ru/downloads/Ulitka%20vnutrennego%20uha%20cheloveka.pdf> (accessed 16.12.2019).
27. Avdeev V.B. O nekotorykh napravleniyakh sovershenstvovaniya metodicheskikh podkhodov, primenyaemykh pri otsenke effektivnosti tekhnicheskoi zashchity informatsii [About some areas of improving methodological approaches used in assessing the effectiveness of technical information protection]. *Spetsial'naya tekhnika – Special Equipment*, 2013, no. 62, pp. 1–10.
28. Kozlachkov S.B., Dvoryankin S.V., Bonch-Bruevich A.M. Ogranicheniya formantnoi teorii razborchivosti rechi v prilozheniyakh zashchity rechevoi informatsii [Limitations of the formant theory of speech intelligibility in voice information protection applications]. *Voprosy kiberneticheskoy bezopasnosti – Cybersecurity Issues*, 2016, no. 5 (18), pp. 28–35.
29. Reva I.L., Trushin V.A., Ivanov A.V., O korrektyrovke metodiki otsenki zashchishchennosti rechevoi informatsii ot utechki po tekhnicheskim kanalams [On correction of estimation technique for voice information protection against leakage through TCIL]. *Spetsial'naya tekhnika – Special Equipment*, 2016, no. 6, pp. 29–35.

Trushin Viktor Aleksandrovich, PhD, senior researcher, associate professor at the Department of Information Security, Faculty of Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is information-measuring systems and information security. He is the author of more than 100 publications including 1 monograph and 22 patents. E-mail: rastr89@mail.ru

Трушин Виктор Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры защиты информации факультета автоматизации и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – информационно-измерительные системы, защита информации. Имеет более 100 публикаций, в том числе одну монографию, 22 патента. E-mail: rastr89@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-135-146

Анализ формантного метода оценки разборчивости речи как метода выполнения косвенных измерений*

В.А. ТРУШИН

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

rastr89@mail.ru

В работе рассматривается формантный метод определения разборчивости речи, предложенный Н.Б. Покровским. Анализируется его суть, алгоритмическая и техническая реализация с точки зрения информационно-измерительного подхода, т. е. как метод выполнения косвенных измерений. Предлагается формирование тестового акустического воздействия на основе унифицированного речеподобного сигнала из слоговых или словесных артикуляционных таблиц. Приводятся результаты экспериментальных исследований по синтезу таких сигналов, их энергетические спектры и плотности распределения вероятностей. Обсуждаются вопросы оценки погрешности в определении разборчивости речи: самого понятия погрешности для разных случаев применения, погрешности косвенных измерений, теоретической погрешности, обусловленной степенью соответствия принятой модели измерения (оценки) разборчивости речи реальному объекту, т. е. слуховому аппарату человека. На основе анализа результатов исследований периферийной слуховой системы делается вывод о необходимости пересмотра принятой модели оценки разборчивости речи.

Ключевые слова: разборчивость речи, формантный метод, артикуляционные испытания, методика выполнения измерений, погрешность оценки разборчивости

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. – Введ. 1997–01–01. – М.: Госстандарт России, 1996. – 229 с.
2. ГОСТ 16600–72. Передача речи по трактам радиотелефонной линии. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных испытаний. – Взамен ГОСТ 16600-71: введ. 01.01.1974. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 90 с.
3. *Рашиевский Я.И., Каргашин В.Л.* Обзор зарубежных методов определения разборчивости речи // *Специальная техника*. – 2002. – № 4. – С. 37–46.
4. *Алдошина И.А., Приттс Р.* Музыкальная акустика. – СПб.: Композитор, 2006. – 760 с.
5. *Покровский Н.Б.* Расчет и измерение разборчивости речи. – М.: Связьиздат, 1962. – 392 с.
6. *Быков Ю.С.* Теория разборчивости речи и повышения эффективности радиотелефонной связи. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 351 с.
7. *Сапожков М.А.* Речевой сигнал в кибернетике и связи. – М.: Связьиздат, 1963. – 452 с.
8. ГОСТ 25902–83. Зрительные залы. Метод определения разборчивости речи. – Введ. 01.01.84. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 10 с.
9. *Железняк В.К., Макаров Ю.К., Хорев А.А.* Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации // *Специальная техника*. – 2000. – № 4. – С. 39–45.

* *Статья получена 16 августа 2019 г.*

10. ГОСТ 17187–2010. Шумомеры. Ч. 1. Технические требования. – Взамен ГОСТ 17187–81 в части технических требований: введ. 2012–11–01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 31 с.
11. ГОСТ 8.563–2009. Методики (методы) измерений. – Взамен ГОСТ Р 8.563–96: введ. 2010–04–15 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Стандартиформ, 2010. – 15 с.
12. *Trushin V.A., Khitsenko V.E.* About the methods of forming a test signal in the instrumental evaluation of speaker clearance // 2019 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, 2019.
13. Справочник по радиовещанию / под общ. ред. В. Выходца. – Киев: Техніка, 1981.
14. *Кропотов Ю.А.* Модель одномерной плотности вероятности речевых сигналов // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 4. – С. 158–170.
15. *Дворянкин С.В., Макаров Ю.К., Хорев А.А.* Обоснование критериев эффективности защиты речевой информации от утечки по техническим каналам // Защита информации. Инсайд. – 2007. – № 2. – С. 18–25.
16. *Козлачков С.Б., Дворянкин С.В., Бонч-Бруевич А.М.* Принципы формирования тестовых речевых сигналов при оценках эффективности технологий шумоочистки // Вопросы кибербезопасности. – 2018. – № 3 (27). – С. 9–16.
17. МИ 2083–90. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценка их погрешностей. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 9 с. – (Рекомендация).
18. *Трушин В.А., Иванов А.В., Рева И.Л.* О методических погрешностях оценки словесной разборчивости речи в задачах защиты информации // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1 (25), ч. 2. – С. 180–185.
19. *Трушин В.А., Иванов А.В., Хиценко В.Е.* О выборе модели тестового сигнала при оценке защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 3. – С. 122–133.
20. *Шиффман Х.Р.* Ощущение и восприятие. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 928 с. – (Мастера психологии).
21. *Альтман Я.А., Таварткиладзе Г.А.* Руководство по аудиологии. – М.: ДМК-Пресс, 2003. – 360 с.
22. *Лабутин В.К., Молчанов А.П.* Модели механизмов слуха. – М.: Энергия, 1973. – 200 с.
23. Физиология речи. Восприятие речи человеком / Л.А. Чистович, А.В. Венцов, М.П. Гранстрем и др. – Л.: Наука, 1976. – 388 с.
24. *Мареев Г.О.* Возможности лазерного автодинного измерителя наносмещений в диагностике заболеваний уха: автореф. дис. ... д-ра мед. наук: 14.01.03. – Саратов, 2013. – 39 с.
25. Лазерные автодинные измерения параметров движения барабанной перепонки / Д.А. Усанов, О.В. Мареев, А.В. Скрипаль, Г.О. Мареев // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т. 16, № 1. – С. 8–21.
26. *Варгин П.С.* Математическая модель улитки внутреннего уха [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.telenavt.ru/downloads/Ulitka%20vnutrennego%20uha%20cheloveka.pdf> (дата обращения: 16.12.2019).
27. *Авдеев В.Б.* О некоторых направлениях совершенствования методических подходов, применяемых при оценке эффективности технической защиты информации // Специальная техника. – 2013. – № 62. – С. 1–10.
28. *Козлачков С.Б., Дворянкин С.В., Бонч-Бруевич А.М.* Ограничения формантной теории разборчивости речи в приложениях защиты речевой информации // Вопросы кибербезопасности. – 2016. – № 5 (18). – С. 28–35.
29. *Рева И.Л., Трушин В.А., Иванов А.В.* О корректировке методики оценки защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам // Специальная техника. – 2016. – № 6. – С. 29–35.

Для цитирования:

Трушин В.А. Анализ формантного метода оценки разборчивости речи как метода выполнения косвенных измерений // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 135–146. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-135-146. – Текст англ.

For citation:

Trushin V.A. The analysis of the formant method of speech intelligibility estimation as a method of performing indirect measurements. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 135–146. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-135-146.

УДК 621.311

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-147-160

О проблемах в эксплуатации оборудования иностранного производства на объектах отечественной энергетики*

В.М. ЛЕВИН^a, К.И. САГАЛАКОВА^b, А.А. ЯХЬЯ^c

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

^a levin@corp.nstu.ru ^b karina.sagalakova@mail.ru ^c ammarazez384@gmail.com

За прошедшее десятилетие на объектах отечественной энергетики неоднократно наблюдались нештатные ситуации, вызванные действием систем мониторинга, защиты и автоматики на сигнал и/или отключение генерирующего и передающего оборудования иностранного производства по условию выхода одного или нескольких контролируемых параметров технического состояния за границы установленных предельных значений. В ряде случаев указанные ситуации сопровождались тяжелыми нежелательными последствиями от нарушений надежности электроснабжения потребителей. При индивидуальном характере и условиях возникновения каждой ситуации можно выделить общие признаки проблемы в эксплуатации электрооборудования иностранного производства.

В качестве примера рассмотрены некоторые аспекты проблемы, возникшей в эксплуатации силовых трансформаторов типа TNEPE-125000/110 PN компании ABB (Asea Brown Boveri Ltd.), установленных на Новосибирской ГЭС. Представлена суть проблемы, выполнен всесторонний экспертный анализ проблемной ситуации. Выявлены вероятные причины, повлекшие развитие нежелательных физических процессов в оборудовании. Сформулирована необходимость поиска решений для повышения наблюдаемости технического состояния ответственного оборудования с фиксацией его отклонений от установленных нормативами предельных значений.

В целях повышения достоверности и обоснованности принимаемых эксплуатационных решений предложено применение обобщенного идентификатора состояния для индикации нежелательных отклонений состояния трансформаторов от нормы и для своевременного введения адекватных корректирующих воздействий. Информационной основой разработки служит ретроспектива протоколов анализа растворенных газов в масле силовых трансформаторов. Формирование критериев для принятия решений осуществляется с применением байесовского классификатора, обеспечивающего минимальный риск ошибки идентификации. Разработан алгоритм принятия оперативных решений, реализующий предложенные теоретические положения и позволяющий интегрировать полученные решения в информационную систему мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования НГЭС.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, маслонаполненные трансформаторы, причины дефектов, диагностика, экспресс-оценка состояния, диагностическая статистика, байесовская классификация, решающее правило

* Статья получена 25 августа 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Высокотехнологичное электротехническое оборудование иностранного производства занимает достаточно прочные позиции на отечественном энергетическом рынке. Этому положению в немалой степени способствует конъюнктура, подогреваемая действиями компаний-производителей через свои представительства на территории России.

По мнению авторов статьи, дать однозначно положительную оценку указанному явлению нельзя. В ряде случаев применения электрооборудования иностранного производства на объектах отечественной энергетики возникает проблема, связанная с их надежной и безопасной эксплуатацией. Это снижает уровень наблюдаемости и управляемости энергообъектов, а зачастую приводит к повышению риска их аварийного отключения с нежелательными последствиями. В настоящей статье обсуждаются отдельные аспекты указанной проблемы, а также предлагается решение, направленное на повышение наблюдаемости и управляемости энергообъектов, на которых в эксплуатации находится электрооборудование иностранного производства.

1. ПРОБЛЕМА ОБОСНОВАННОСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НОВОСИБИРСКОЙ ГЭС

На Новосибирской гидроэлектростанции (НГЭС) в 2009–2010 годах установлены 5 трансформаторов типа TNEPE-125000/110 PN, а в 2013 году – группа однофазных автотрансформаторов AR1ES3E-120000/220/110 PN. Начиная с 2013 года у указанных трансформаторов проявляется тенденция к повышению концентраций оксида и диоксида углерода в масле. Периодически концентрации указанных газов выходят за граничные нормы (согласно [1], граничные концентрации CO составляют 0,05 %, а CO₂ – 0,2 %). В качестве корректирующей меры периодически производилась дегазация масла, однако после некоторого времени концентрации CO и CO₂ вновь начинали расти. Указанная тенденция опасна с точки зрения дальнейшей эксплуатации трансформаторов и вызывает обоснованную тревогу службы технической диагностики НГЭС.

Первоначально предполагалось, что рост оксида и диоксида углерода связан с ростом потерь холостого хода. Согласно заводским испытаниям, исходные потери холостого хода составляли 56,48 кВт, а согласно протоколу от 04.09.2017 их значение составило 84,79 кВт, что выше исходных на 57,6 %. Согласно [1], предельно допустимое превышение ΔP_x составляет 30 % за весь срок службы трансформатора. Полученный результат неизбежно требует вывода трансформаторов из работы для дальнейшего обследования и ремонта. Однако оставались сомнения, которые заставили службу технической диагностики НГЭС обратиться за консультацией в компанию-производитель. В результате последней проверки потерь холостого хода, выполненной с участием представителей компании, у трансформаторов 110 кВ на примере Т-3 (26.03.2019) оказалось, что потери холостого хода находятся на вполне приемлемом уровне и превышают паспортные значения лишь на 9,85 % (наибольшее из имеющихся значений).

Повышенные значения потерь холостого хода объясняются использованием разных методов их измерения производителем (компания АВВ) и в условиях эксплуатации на Новосибирской ГЭС. Измерения на заводе-производителе выполнялись в соответствии с нормативными требованиями, согласно которым к испытываемому трансформатору подводится номинальное напряжение. Измерения в условиях эксплуатации на НГЭС выполнялись в соответствии с требованиями национального стандарта РФ [1], согласно которым к трансформатору подводилось пониженное напряжение. Это и явилось причиной значительных расхождений в паспортных (исходных) и текущих измеренных значениях контролируемого параметра ΔP_x .

Таким образом, отсутствие должного подхода к согласованию (адаптации) нормативных требований по эксплуатации и оценке технического состояния оборудования иностранного производства на примере силовых маслонаполненных трансформаторов, установленных на НГЭС, способствует принятию необоснованных решений об их отбраковке по техническому состоянию, длительному простоя и дорогостоящему ремонту.

2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ

Несмотря на то что опасения критического роста потерь холостого хода трансформаторов не нашли подтверждения, систематическое увеличение концентраций CO и CO₂, растворенных в масле (рис. 1), представляет опасную для эксплуатации тенденцию и требует более детального анализа.

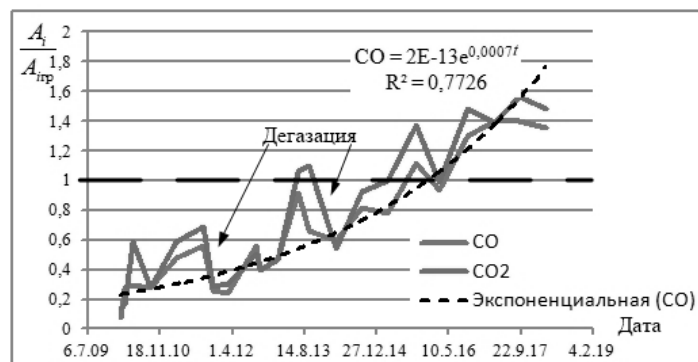


Рис. 1. Монотонный рост концентраций CO и CO₂ в масле трансформаторов 110 кВ НГЭС

Fig. 1. Monotonous growth of CO and CO₂ concentrations in the NHPS 110 kV transformers oil

Рост концентраций оксида и диоксида углерода в трансформаторном масле указывает на возможное ускоренное старение и увлажнение масла и/или целлюлозной изоляции, а также повышенный нагрев целлюлозной изоляции [2]. Причины, вызывающие ускоренное старение, могут быть следующими.

1. Повышенная нагрузка, приводящая к увеличению температуры активной части трансформатора. Однако у исследуемых трансформаторов нагрузка

поддерживалась постоянной, коэффициент загрузки находился на уровне 0,5...0,6 о.е. относительно номинальной мощности трансформаторов, что исключает сделанное предположение. Тогда возникает другое предположение: повышенные температуры могут быть вызваны нарушенной циркуляцией масла из-за возможных неисправностей системы охлаждения. Для трансформаторов систем охлаждения типа Д и ДЦ такие неисправности обычно связаны с загрязнением трубок охлаждающего калорифера из-за втягивания воздуха работающими вентиляторами либо с засорением масляных фильтров [3]. Однако по данным эксплуатации подобных проблем с системой охлаждения трансформаторов установлено не было.

2. Дефекты термического характера, вызывающие локальные перегревы бумажной изоляции. Указанные дефекты характеризуются повышенными температурами наиболее нагретых точек [2] и вызваны внутренними повреждениями. Они могут быть вызваны местными перегревами за счет нарушения межлистовой изоляции пластин магнитопровода, а также при замыкании этих пластин токопроводящими частицами или между собой, что приводит к росту вихревых токов, а следовательно, и к росту потерь холостого хода. Кроме того, перегрев может быть вызван увеличением переходного сопротивления в контактных соединениях, уменьшением сечения масляных каналов из-за деформации (разбухания) изоляции обмоток [3]. Согласно данным эксплуатации и встроенных систем диагностического мониторинга трансформаторов, температура верхних и нижних слоев масла не превышала 55 °С, что является вполне приемлемым.

Косвенным подтверждением перегрева служит повышенное значение концентрации этилена C_2H_4 в масле, однако его фактическая концентрация не превышала граничных значений для всех трансформаторов.

3. Повышенная степень увлажнения масла (бумаги). Главным источником влаги является атмосферная влага, которая проникает при нарушении герметичности (особенно через ослабленные уплотнения). Герметичность может быть нарушена вследствие ухудшения качества пленочной защиты трансформатора. О надежности защиты можно судить по показателям кислотного числа и содержанию антиокислительной присадки в масле [4]. Согласно имеющимся данным, у исследуемых трансформаторов периодически наблюдается нарушение герметичности. Согласно акту выполненных работ от 11.04.2013, на трансформаторах Т-1 и Т-2 была устранена протечка масла по фланцевому соединению на указателе потока масла. На трансформаторе Т-4 была устранена протечка масла на входе охладителя второй группы № Р21 системы охлаждения. Также при выполнении корректирующих работ проверялась целостность пленочной защиты. В процессе тренировки пленки масло выходило с микропузырями воздуха. Все наблюдения говорят о том, что в процессе эксплуатации у трансформаторов нарушалась герметичность. Параметром, позволяющим оценить негативное влияние влаги, является электрическая прочность масла [2, 8]. Согласно результатам физико-химического анализа масла (ФХА), пробивное напряжение масла находится в норме. Также результаты ФХА (а именно тангенс угла диэлектрических потерь масла) могут помочь в проверке другого предположения, касающегося присутствия эмульсионной воды (не растворенной в масле), вызывающей рост диэлектрических потерь [5, 10]. По полученным эксплуатацией резуль-

татам ФХА масла из баков исследуемых трансформаторов влагосодержание не превышало допустимых норм. Согласно протоколу от 21.03.2018, влагосодержание составляло 6,1 г/т, в то время как норматив – 25 г/т.

4. Качество и эксплуатационные характеристики масла Nytro 11 GX. Эксплуатационные показатели масла марки Nytro 11 GX находятся на высоком уровне, указанное масло обладает хорошей теплоотводящей способностью, высокой устойчивостью к окислению. По газостойкости в электрическом поле в среде ионизированного водорода масло является газвыделяющим, т. е. может повышать общий фон концентраций растворенных в нем газов [6, 7].

5. Косвенные характеристики окислительных процессов – фурановые производные. Наличие защиты – антиокислительная присадка «ионол». Согласно [4], количество ионола в трансформаторном масле должно быть не меньше 0,2 % массы. При эксплуатации трансформаторного масла идет непрерывный процесс расходования присадки, скорость которого зависит от многих факторов, особенно от температуры и концентрации кислорода в масле. При снижении концентрации ионола ниже 0,1 % эксплуатация трансформаторного масла недопустима, поскольку возможно образование шлама. Кроме того, при малых концентрациях ионола последний перестает работать как ингибитор и становится инициатором окисления [4]. Согласно [6], первая проверка качества масла после введения присадки производится через 5 лет эксплуатации, а затем в зависимости от кислотного числа – через 3 или через 5 лет. Поэтому можно сделать еще одно рабочее предположение по поводу роста концентраций СО – концентрация ионола в масле стала ниже допустимого предела. Однако по имеющимся у эксплуатации данным концентрация антиокислительной присадки находится в допустимых пределах. В процессе эксплуатации трансформаторов происходит деструкция бумажной изоляции, в результате которой образуются фурановые производные [7]. Термическая деструкция целлюлозы как раз вызывает выделение кислот и оксидов углерода [3, 9]. Но опять же, согласно результатам ФХА, содержание фурановых производных в масле исследуемых трансформаторов не превышает допустимых пределов.

Детальный анализ возможных причин, приводящих к опасному росту концентраций СО и СО₂ в масле обследуемых трансформаторов, и сопоставление имеющихся данных о результатах диагностических испытаний позволяют сделать следующий вывод. Наблюдающийся монотонный рост концентраций оксида и диоксида углерода в трансформаторном масле с большой степенью вероятности вызван локальным нарушением герметичности (целостности пленочной защиты) трансформаторов, поскольку остальные индикаторы технического состояния находятся в допустимых пределах.

3. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

Одна из мер по снижению критичности указанной проблемы, направленная на повышение наблюдаемости технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов и обоснованности принимаемых эксплуатационных решений, заключается в применении обобщенного идентификато-

ра состояния (ОИС). В качестве ОИС может быть использована нелинейная свертка вида

$$G = \sum_{i=1}^7 \left[\left(\frac{A_i}{A_{igr}} \right)^2 / \sum_{i=1}^7 \left(\frac{A_i}{A_{igr}} \right) \right], \quad (1)$$

которая рассчитывается по данным протоколов анализа растворенных газов (АРГ) в масле трансформаторов [11, 12] и представляет собой случайную величину, зависящую от определенного набора факторов [13, 14]. Важным стохастическим свойством случайной величины (1) является чувствительность к проявлениям характерных дефектов в трансформаторе, вызывающих превышения концентраций отдельных ключевых газов A_i над рекомендуемыми пределами концентраций A_{igr} [11]. Ключевым принято называть газ, растворенный в масле силового трансформатора и имеющий максимальное превышение рекомендуемого предела концентраций. В табл. 1 показан характер возможных дефектов в трансформаторе, интерпретируемый по критерию ключевого газа.

Таблица 1

Table 1

Характер дефектов в трансформаторе по критерию ключевого газа

Nature of defects in the transformer according to the key gas criterion

Ключевой газ	Повышенное содержание газов	Характер дефекта в трансформаторе
C ₂ H ₂	H ₂	Дуга в масле
	H ₂ , CO, CO ₂	Дуга в масле, затронута бумага
H ₂	CH ₄ , C ₂ H ₆	Перегрев масла < 150 °С
	CH ₄ , C ₂ H ₆ , CO, CO ₂	Перегрев бумаги < 150 °С
	–	Частичные разряды в масле
	CO, CO ₂	Частичные разряды в бумаге
C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Перегрев масла > 600 °С
	–	Перегрев бумаги > 600 °С
CO	–	Старение, увлажнение масла

Данными табл. 1 подтверждается вывод экспертизы о возможном характере дефекта в исследуемых трансформаторах НГЭС. Появление CO в роли ключевого газа в отсутствие других сопутствующих проявлений однозначно указывает на старение и/или увлажнение масла, которое может быть следствием локального нарушения герметичности трансформаторов.

Применение вычислительной процедуры, включающей формирование статистической выборки G на основе протоколов АРГ группы исследуемых

однотипных трансформаторов НГЭС, выделение дихотомии классов технического состояния трансформаторов Π_1 – «норма», Π_2 – «отклонения от нормы» по критерию

$$A_i \leq A_{igr} \in \Pi_1,$$

$$A_i > A_{igr} \in \Pi_2,$$

позволяет рассчитать числовые характеристики случайной величины G – математическое ожидание (M_j) и среднеквадратическое отклонение (σ_j) в каждом из $j = 2$ классов состояний (табл. 2) и определить стартовое значение границы их раздела

$$G_{гр} = M_1 + k \cdot \sigma_1. \quad (2)$$

В процессе эксплуатации стартовое значение $G_{гр}$ подлежит периодической корректировке по мере накопления статистики (пополнения базы протоколов АРГ). Кроме того, возможность адаптации решающего правила

$$G \leq G_{гр} \in \Pi_1, \quad (3)$$

$$G > G_{гр} \in \Pi_2$$

к актуальным процессам в контролируемых трансформаторах заключается в выборе значения вычислительной константы $k = 2 - 3$ из условия минимума суммарной ошибки распознавания [13].

Таблица 2

Table 2

Числовые характеристики распределения G для дихотомии классов

Numerical characteristics of the G distribution for class dichotomy

Классы состояний	Числовые характеристики случайного распределения	
Π_1	$M_1 = 0,529$	$\sigma_1 = 0,259$
Π_2	$M_2 = 1,326$	$\sigma_2 = 0,266$

С использованием числовых характеристик случайной величины G по выражению (2) получена граница раздела классов технических состояний

$$G_{гр} = 0,529 + 2 \cdot 0,259 = 1,037.$$

На рис. 2 приведена гистограмма относительных частот случайной величины G в классах Π_1 и Π_2 , которая отражает как формат, так и статистиче-

ские свойства используемого диагностического признака. Таким образом, гистограмма относительных частот случайного распределения G для выделенной дихотомии классов технического состояния трансформаторов наглядно демонстрирует возможности решающего правила (3), согласно которому удастся выявить опасную тенденцию $G > G_{\text{Гр}}$, требующую в качестве адекватного корректирующего воздействия выполнения дегазации трансформаторного масла.

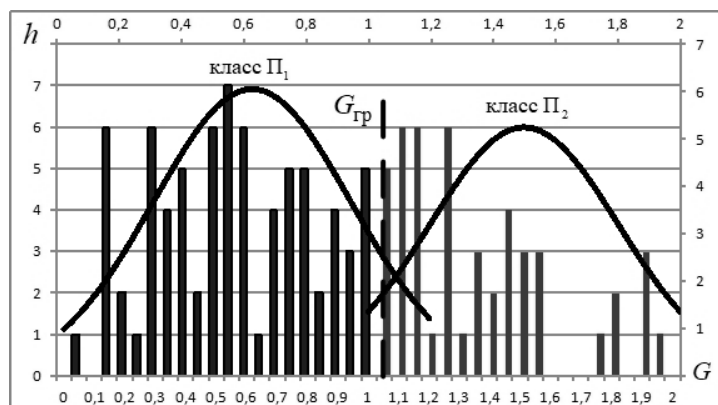


Рис. 2. Гистограмма относительных частот случайного распределения G

Fig. 2. A histogram of relative frequencies of the G random distribution

Для реализации разработанного подхода и возможности интеграции полученных моделей и критериев в информационную систему мониторинга и диагностики электрооборудования ГЭС требуется разработка подсистемы поддержки принятия решений, предназначенной выполнять ряд специальных функций и направленной на обеспечение эксплуатационной надежности энергообъекта. На рис. 3 представлена структурно-функциональная схема подсистемы поддержки принятия решений по оценке технического состояния трансформаторов НГЭС и выбору адекватных корректирующих воздействий.

Указанная подсистема включает пять взаимосвязанных функциональных блоков, каждый из которых в зависимости от назначения обеспечивает решение комплекса задач: сбор и обработку текущей диагностической информации по трансформаторам, формирование и хранение статистики, вычисление решающих правил, идентификацию текущего состояния трансформаторов, выбор адекватного корректирующего воздействия, визуализацию данных.

Подсистема функционирует следующим образом. На вход вычислительного блока (ВБ) и блока памяти (БП) периодически поступает диагностическая информация двух типов. Во-первых, это данные с датчиков встроенных локальных систем online-мониторинга трансформаторов $1, 2, \dots, n$, такие как концентрации оксида (СО) и диоксида углерода (СО₂), в % об.; температуры верхних слоев масла, в °С; мощности электрических нагрузок, в МВ·А, и др. Во-вторых, данные периодического offline-диагностирования: результаты АРГ

и ФХА масла (влагосодержание, кислотное число, тангенс угла диэлектрических потерь, пробивное напряжение), потери холостого хода ΔP_x . В вычислительном блоке производится вычисление ОИС по формуле (1), формирование статистических выборок функции G для дихотомии классов состояний Π_1 , Π_2 и расчеты ее граничных значений $G_{гр}$ по выражению (2).

Блок памяти предназначен для хранения результатов вычислений. Кроме этого, в нем содержится нормативно-справочная информация (НСИ), в состав которой входят предельно допустимые значения контролируемых параметров, ретроспективные данные многолетних наблюдений за параметрами состояния трансформаторов с применением методов *offline*-диагностирования и пр. Блок сравнения (БС) осуществляет логические операции сравнения текущих значений контролируемых параметров со значениями установленных предельных норм и непосредственно связан с блоком принятия решения (БПР), в котором в зависимости от исхода операций сравнения производится идентификация текущего состояния каждого из трансформаторов, а также выбор адекватных корректирующих воздействий, направленных на обеспечение их эксплуатационной надежности. Интерфейс вывода данных (ИВД) обеспечивает визуализацию результатов оценки состояния трансформаторов и рекомендаций по введению корректирующих эксплуатационных воздействий.

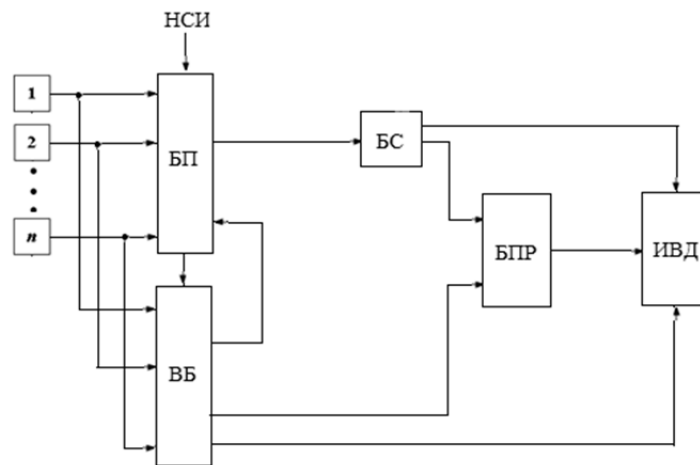


Рис. 3. Структурно-функциональная схема подсистемы поддержки принятия решений по эксплуатации трансформаторов НГЭС:

1, 2, ..., n – контролируемые трансформаторы; ВБ – вычислительный блок; БП – блок памяти; НСИ – нормативно-справочная информация; БС – блок сравнения; БПР – блок принятия решений (блок идентификации); ИВД – интерфейс вывода данных

Fig. 3. A structural-functional diagram of the subsystem of decision-making support for NHPP power transformer operation

1 and 2 are n controlled transformers; ВБ is a computing unit; БП is a memory unit; НСИ is normative-reference information, БС is a decision-making unit (an identification unit); ИВД is a data output interface

В процессе функционирования подсистемы поддержки принятия решений по эксплуатации трансформаторов НГЭС реализуется следующий операционный алгоритм.

1. Начало.
2. Ввод исходных данных, включая ретроспективу протоколов АРГ.
3. Расчеты ОИС по формуле (1).
4. Формирование вариационного ряда G .
5. Расчеты статистических моментов распределения G и вычисление $G_{гр}$ по формуле (2).
6. Если $G \leq G_{гр}$, то класс состояния трансформатора Π_1 «норма».
7. Конец.
8. Иначе, если $G > G_{гр}$, то класс состояния трансформатора Π_2 «отклонение от нормы».
9. Если СО (или СО и СО₂) – ключевой газ, то необходима проверка наличия сопутствующих факторов.
10. Если сопутствующие факторы не зафиксированы, то рекомендована дегазация масла трансформатора, переход к п. 7.
11. Если температура верхних слоев масла в баке трансформатора превысила предельно допустимую норму при значении электрической мощности нагрузки $\leq 0,6$ от номинального, то вероятна неисправность в системе охлаждения, рекомендована ревизия системы охлаждения, переход к п. 7.
12. Если концентрация С₂Н₄ превысила допустимую предельную норму, то вероятен термический дефект активной части трансформатора в диапазоне высоких температур ($\theta > 600$ °С), рекомендовано тепловизионное обследование для локализации места и уточнения причины дефекта, переход к п. 7.
13. Если наблюдается существенное (более 5 % от предшествующего значения) увеличение потерь холостого хода трансформатора, то вероятен дефект в магнитопроводе, рекомендовано тепловизионное обследование, переход к п. 7.
14. Если пробивное напряжение масла трансформатора стало ниже допустимой предельной нормы, то вероятно повышенное увлажнение масла и/или целлюлозной изоляции, рекомендовано испытание бака (пленочной защиты) на герметичность, переход к п. 7.
15. Если содержание фурановых производных в масле трансформатора превысило допустимый предельный уровень, то вероятна термическая деструкция целлюлозы, рекомендован повторный контроль фурановых производных для оценки динамики процесса, переход к п. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Эксплуатация оборудования иностранного производства на объектах отечественной энергетики зачастую осложняется проблемой отсутствия должного подхода по согласованию (адаптации) нормативных документов заводов-производителей к требованиям отечественных стандартов по диагностике, оценке технического состояния и эксплуатации соответствующих видов электрооборудования. Наличие указанной проблемы может приводить к

принятию необоснованных и несвоевременных эксплуатационных решений, длительному простоя и дорогостоящему ремонту оборудования.

2. Характерные аспекты указанной проблемы проиллюстрированы на примере силовых трансформаторов 110 кВ НГЭС, у которых наблюдается опасная с точки зрения надежной эксплуатации тенденция увеличения концентраций СО и СО₂, растворенных в масле, а обнаружение истинной причины явления затрудняется отсутствием согласованных требований к выполнению измерений диагностических параметров.

3. Одним из эффективных методов своевременного распознавания и индикации характерных отклонений технического состояния трансформатора от нормы является применение решающего правила (3) на основе ОИС. Метод обеспечивает высокую достоверность распознавания и представляет собой основу автоматизированной системы диагностического мониторинга и принятия решений по надежной и безопасной эксплуатации оборудования.

4. Практическая реализация разработанного подхода направлена на повышение наблюдаемости технического состояния основного оборудования НГЭС и базируется на создании подсистемы поддержки принятия решений по эксплуатации трансформаторов с возможностью ее интеграции в действующую информационную систему мониторинга и диагностики электрооборудования ГЭС. С этой целью разработано алгоритмическое обеспечение комплекса решаемых задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 34.01-23.1-001–2017. Объем и нормы испытания электрооборудования. – Взамен СО 34.45-51.300–97 (РД 34.45-51.300–97): введ. 29.05.2017. – М.: ПАО «Россети», 2017. – 262 с. – (Стандарт организации ПАО «Россети»).
2. *Алексеев Б.А.* Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии. – М.: НТФ «Энергопрогресс»: Энергетик, 2010. – 92 с.
3. *Щеглов Н.В.* Электрооборудование высокого напряжения и его эксплуатация: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 139 с.
4. РД 34.43.105–83. Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел. – М.: Союзтехэнерго, 1989. – 24 с.
5. *Липштейн Р.А., Шахнович М.И.* Трансформаторное масло. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
6. *Липштейн Р.А., Глазунова Т.В., Довгопольный Е.Е.* Шведские трансформаторные масла фирмы «Nynas» марок Nitro 11GX и Nitro 10X // Электрические станции. – 1998. – № 1. – С. 61–64.
7. РД 34.43.101–82. Типовая инструкция по продлению срока службы трансформаторных масел с помощью присадки «Антралиловая кислота». – М.: Союзтехэнерго, 1982. – 15 с.
8. *Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М.* Методика автоматического обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2004. – № 4. – С. 64–68.
9. Исследование новых сорбентов для газохроматографического анализа фурановых производных в трансформаторном масле / В.Ф. Новиков, А.А. Карташов, И.А. Галишина, О.И. Федоренко, А.В. Танеева // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 99–103.
10. *Стрижова Т.А.* Физико-химический анализ маслonaполненного оборудования в диагностике подстанций // Вестник АПК Верхневолжья. – 2016. – № 2 (34). – С. 79–84.
11. РД 153-34.0-46.302–00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – М.: ЭНАС, 2000. – 25 с.

12. IEEE Std C 57.104–2008. IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers. – New York, 2009. – 28 p.

13. Левин В.М. Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при их техническом обслуживании по состоянию // Промышленная энергетика. – 2013. – № 8. – С. 37–42.

14. Левин В.М., Яхья А.А. Адаптивное управление техническим состоянием силовых трансформаторов // Новое в российской электроэнергетике. – 2018. – № 11. – С. 81–89.

Левин Владимир Михайлович, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика и эксплуатационная надежность электрооборудования. Имеет более 80 публикаций. E-mail: levin@corp.nstu.ru

Сагалакова Карина Ивановна, магистрант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика маслонаполненных трансформаторов. Имеет 5 публикаций. E-mail: karina.sagalakova@mail.ru

Яхья Аммар Абдулазиз, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика и оценка технического состояния силового маслонаполненного оборудования. Имеет 7 публикаций. E-mail: ammarazez384@gmail.com

Levin Vladimir Mikhailovich, D.Sc. (Eng.), head of the department of automated power systems, Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is diagnostics and service reliability of electric power equipment. He is the author of more than 80 publications. E-mail: levin@corp.nstu.ru

Sagalakova Karina Ivanovna, a graduate student at the department of automated power systems, Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is oil-filled transformer diagnostics. She has published 5 research papers. E-mail: karina.sagalakova@mail.ru

Yahya Ammar Abdulaziz, a postgraduate student at the department of automated power systems, Novosibirsk State Technical University. The main field of his research includes diagnostics and evaluation of technical condition of power oil-filled equipment. He has published 7 research papers. E-mail: ammarazez384@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-147-160

On problems in the operation of foreign-made equipment at Russian energy facilities*

V.M. LEVIN^a, K.I. SAGALAKOVA^b, A.A. YAHYA^c

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a levin@corp.nstu.ru ^b karina.sagalakova@mail.ru ^c ammarazez384@gmail.com

Abstract

Over the past decade, abnormal situations caused by the action of monitoring, protection and automation systems on the signal and/or shutdown of generating and transmitting equipment of foreign manufacture have repeatedly been observed at Russian energy facilities when one or more controlled parameters of their technical condition exceeded the established limit

* Received 25 August 2019.

values. In some cases, these situations were accompanied by severe undesirable consequences caused by violations of power supply to consumers. With an individual character of each situation, it is possible to distinguish general aspects of a problem in the operation of electric equipment of foreign manufacture. They are discussed in the article.

As an example, some aspects of the problems encountered in the operation of the PNEPE-125000/110 PN ABB (Asea Brown Boveri Ltd.) power transformer type installed at the Novosibirsk HPP are considered. The essence of the problem is shown and a comprehensive expert analysis of the problem situation is made. The probable causes that led to the development of undesirable physical processes in the equipment are revealed. The necessity of finding solutions to improve the observability of deviations of the critical equipment technical condition from the established norms is formulated.

In order to increase the reliability and validity of operational decisions, it is proposed to use a generalized status identifier to indicate undesirable deviations of transformers from the norm and timely introduction of adequate corrective actions. The information basis of the development is a retrospective review of the analysis protocols of dissolved gases in the power transformer oil. The formation of criteria for decision-making is carried out using the Bayesian classifier, which provides a minimum risk of identification errors. The algorithm of operational decision-making is developed, which implements the proposed theoretical provisions and allows integrating the obtained solutions into the information system of monitoring and diagnostics of transformer equipment of NPP. The algorithmic implementation of the developed approach is developed

Keywords: reliability of power supply, oil-filled transformers, causes of defects, diagnostics, condition rapid assessment, diagnostic statistics, Bayesian classification, decision rule

REFERENCES

1. STO 34.01-23.1-001–2017. *Ob"em i normy ispytaniya elektrooborudovaniya* [Standard organization 34.01-23.1-001–2017. Scope and standards of testing electrical equipment]. Moscow, PJSC Rosseti Publ., 2017. 262 p.
2. Alekseev B.A. *Krupnye silovye transformatory: kontrol' sostoyaniya v rabote i pri revizii* [Large power transformers: state monitoring in operation and during revision]. Moscow, Energoprogress Publ., Energetik Publ., 2010. 92 p.
3. Shcheglov N.V. *Elektrooborudovanie vysokogo napryazheniya i ego ekspluatatsiya* [High-voltage electrical equipment and its operation]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017. 139 p.
4. RD 34.43.105–83. *Metodicheskie ukazaniya po ekspluatatsii transformatornykh masel* [Regulating document 34.43.105–83. Guidelines for the operation of transformer oils]. Moscow, Soyuztekhnenergo Publ., 1989. 24 p.
5. Lipshtein R.A., Shakhnovich M.I. *Transformatornoe maslo* [Transformer oil]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.
6. Lipshtein R.A., Glazunova T.V., Shvedskie transformatornye masla firmy "Nynas" marok Nitro 11GX i Nitro 10X [Swedish transformer oils from Nynas, Nitro 11GX and Nitro 10X]. *Elektricheskie stantsii – Power Plants*, 1998, no. 1, pp. 61–64. (In Russian).
7. RD 34.43.101–82. *Tipovaya instruktsiya po prodleniyu sroka sluzhby transformatornykh masel s pomoshch'yu prisadki "Antranilovaya kislota"* [Regulating document 34.43.101–82. Typical instruction for extending the service life of transformer oils using the additive "Anthranilic acid"]. Moscow, Soyuztekhnenergo Publ., 1982. 15 p.
8. Shirokov O.G., Zaliznyi D.I., Los' D.M. Metodika avtomaticheskogo obnaruzheniya nenormal'nogo nagreva silovogo transformatora [Technique for automatic detection of abnormal heating of a power transformer]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo – Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel*, 2004, no. 4, pp. 64–68.
9. Novikov V.F., Kartashov A.A., Galishina I.A., Fedorenko O.I., Taneeva A.V. Issledovanie novykh sorbentov dlya gazokhromatograficheskogo analiza furanovykh proizvodnykh v transformatornom masle [Study of new sorbents for gas chromatographic analysis of furan derivatives in transformer oil]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of Kazan Technological University*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 99–103.

10. Strizhova T.A. Fiziko-khimicheskii analiz maslonapolnennogo oborudovaniya v diagnostike podstantsii [The Physical and chemical analysis of isolation of oil-filled equipment in diagnosis of substations]. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya – Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region*, 2016, no. 2 (34), pp. 79–84. (In Russian).

11. RD 153-34.0-46.302-00. *Metodicheskie ukazaniya po diagnostike razvivayushchikhsya defektov transformatornogo oborudovaniya po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenykh v masle* [Regulating document 153-34.0-46.302-00. Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Moscow, ENAS Publ., 2000. 25 p.

12. IEEE Standards C57.104-2008. *IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers*. New York, 2009. 28 p.

13. Levin V.M. Statisticheskii metod raspoznavaniya defektov v silovykh transformatorakh pri ikh tekhnicheskoy obsluzhivaniy po sostoyaniyu [Statistical method of recognition of defects in power transformers at their maintenance on a condition]. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 2013, no. 8, pp. 37–42.

14. Levin V.M., Yahya A.A. Adaptivnoye upravleniye tekhnicheskim sostoyaniem silovykh transformatorov [Adaptive management of the power transformers technical condition]. *Novoe v rossiiskoy elektroenergetike – New in the Russian Electrical Power-Engineering*. 2018, no. 11, pp. 81–89.

Для цитирования:

Левин В.М., Сагалакова К.И., Яхья А.А. О проблемах в эксплуатации оборудования иностранного производства на объектах отечественной энергетики // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 147–160. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-147-160.

For citation:

Levin V.M., Sagalakova K.I., Yahya A.A. O problemakh v ekspluatatsii oborudovaniya inostrannogo proizvodstva na ob"ektakh otechestvennoy energetiki [On problems in the operation of foreign-made equipment at Russian energy facilities]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 147–160. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-147-160.

Повышение качества электроэнергии путем регулирования вентильных генераторов*

М.Ю. НИКОЛАЕВ^{1,a}, В.В. МАКАРОВ^{1,b}, В.О. КРОПОТИН^{1,c},
А.С. ГРИЦАЙ^{1,d}, А.В. ГААК^{2,e}

¹ 644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет

² 644050, Россия, г. Москва, Погорельский пер., 7, стр. 2, АО «Объединенная теплоэнергетическая компания»

^a munp@yandex.ru ^b kosmos070969@mail.ru ^c kropotin_vl@mail.ru

^d aleksandr.gritsay@gmail.com ^e vti2016@gmail.com

Компрессорный цех с группой газоперекачивающих агрегатов является основным технологическим объектом компрессорной станции. На компрессорной станции может быть несколько таких цехов с различными типами агрегатов. Обычно число цехов на компрессорных станциях соответствует числу ниток магистрального газопровода, которые подходят к станции. В технологическом процессе по мере прокладки новых ниток газопровода на компрессорной станции также предусматривается строительство новых цехов. При активной добыче в течение некоторого промежутка времени месторождение газа истощается и снижается дебет его скважин, уменьшаются объемы транспортируемого по магистрали газа, что приводит к необходимости изменения режимов работы имеющихся газоперекачивающих агрегатов. Поскольку транспортировка природного газа по магистральным газопроводам приводит к снижению давления газа, на газопроводе устанавливаются высокотехнологичные турбины, поддерживающие необходимое давление. Однако для работы таких турбин требуется электроэнергия соответствующего качества. Актуальность исследований обусловлена происходящей технологической революцией, связанной с оцифровкой окружающего мира. Использование многочисленных датчиков в электротехнических системах ведет к повышению требований к качеству электроэнергии в электрической сети. Увеличение количества анализируемых данных ведет к принципиально новому развитию электроэнергетического комплекса. Предиктивная аналитика повышает время бесперебойной работы оборудования, способствует росту ресурсосберегающих технологий и минимизирует потери напряжения в сетях питания газоперекачивающих агрегатов, а также затраты на их обслуживание. Существует достаточно большое количество вариантов обеспечения надлежащего качества электроэнергии [1]. В настоящей работе предлагается схмотехническое решение, базирующееся на использовании таких элементов, как преобразователь частоты, выпрямитель, фильтр и инвертор. Также в работе исследовано влияние этих устройств и их режимов работы на перекачку газа с помощью газоперекачивающего агрегата.

Ключевые слова: вентильные генераторы, газоперекачивающий агрегат, компрессорный цех, стабилизация напряжения, регулирование работы, умная сеть, микрогрид, напряжение, энергосистема

* Статья получена 11 мая 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

В России газовая промышленность является одной из ведущих и динамично развивающихся отраслей народного хозяйства. Специфика этой отрасли заключается в том, что месторождения находятся от потребителей на достаточно больших расстояниях, и требуется обеспечить передачу газа по магистральному газопроводу (МГ). Это накладывает определенные ограничения, поскольку в виду гидравлического сопротивления магистрального трубопровода происходит уменьшение давления газа [2, 3]. Для поддержания требуемого давления в магистрали производится его компримирование в компрессорных цехах (КЦ), которые сооружаются непосредственно на трассе газопровода. По сути КЦ является изолированной микроэнергосистемой.

В процессе эксплуатации магистрального газопровода режим компримирования газа необходимо регулировать. Наиболее актуальным является сезонное регулирование. Так, например, летом при повышении температуры окружающего воздуха мощность, вырабатываемая газовой турбиной, падает, поэтому требуется понизить и мощность, потребляемую нагнетателем.

С одной стороны, для оптимизации режима работы газопровода требуется регулировка работы компрессоров для обеспечения наиболее эффективной работы с точки зрения затрат и экологических норм; с другой стороны, происходит стабилизация напряжения, вырабатываемого генератором, который использует энергию для собственных нужд газоперекачивающей станции. Вопросы управления режимами компрессоров являются актуальными и исследуются во многих странах мира, включая Россию.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлено схематическое решение системы стабилизации напряжения. При изменении режима работы турбины 1 возникает необходимость обеспечения заданного качества электрической энергии [1], используемой для работы электроприемников газоперекачивающего агрегата (ГПА) [4]. В этом случае обеспечение качества электроэнергии поддерживается стабилизацией выходного напряжения вентильного генератора 2.

Для регулирования напряжения на зажимах вентильного генератора используется система возбуждения 3. С целью поддержания необходимого напряжения на зажимах генератора в схеме используется система управления генератором 5, в которой применяются датчик напряжения 4 и система возбуждения 3. Информация о выходном уровне напряжения фиксируется датчиком и переходит в систему управления генератором для сравнения с необходимым значением уровня напряжения. Обработанный сигнал управляет системой возбуждения синхронного генератора (СГ) и поддерживает уровень напряжения в заданных пределах.

Цель исследования – уменьшение пределов допустимого отклонения напряжения с помощью стабилизации выходного напряжения и использования схематического решения на основе вентильного генератора. Объектом исследования являются компрессорные цеха, газоперекачивающие агрегаты, вентильные генераторы и комплекс стабилизирующего напряжение оборудования.

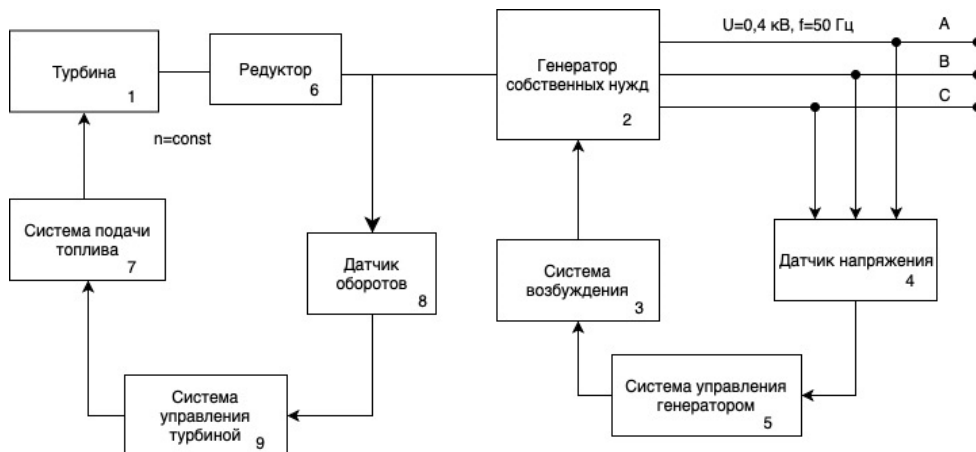


Рис. 1. Функциональная схема электрической части турбины:

1 – турбина, 2 – генератор собственных нужд, 3 – система возбуждения, 4 – датчик напряжения, 5 – система управления генератором, 6 – редуктор, 7 – система подачи топлива, 8 – датчик оборотов, 9 – система управления турбиной

Fig. 1. A functional diagram of the turbine electric part:

1 is a turbine, 2 is a house generator, 3 is an excitation system, 4 is a voltage sensing device, 5 is a generator control system, 6 is a reduction unit, 7 is a fuel feeding system, 8 is a rpm sensor, 9 is a turbine control system

2. ТЕОРИЯ

На практике регулирование режимов работы нагнетателя осуществляется путем изменения частоты вращения силового вала газовой турбины в диапазоне 70...105 %. При изменении частоты вращения вала также меняется значение электродвижущей силы (ЭДС) вентильного генератора, в связи с чем возникает задача обеспечения заданного качества электрической энергии [1], используемой для работы электроприемников ГПА. Подобная задача уже решалась ранее [5]. Авторами была разработана микропроцессорная система управления в сочетании со статическим компенсатором реактивной мощности для регулирования и стабилизации напряжения в электроэнергетической системе на заданном уровне. Однако такое решение имело ограничение – зависимость от типа и величины нагрузки. Поэтому для устранения этого ограничения и улучшения качества электроэнергии было проведено исследование в программном комплексе MATLAB, в котором на основе исследования было подтверждено, что стабилизация возможна путем поддержания индуктивности намагничивающего контура на постоянном уровне [6].

В [7] предлагалось другое схемотехническое решение повышения качества стабилизации в стабилизаторах напряжения. Однако использовать такое решение возможно лишь в сетях постоянного тока, что значительно сужает его область применения.

Кроме того, ранее были также предложены подходы к регулированию уровня напряжения, основанные на двухэтапной архитектуре с событийным управлением [8], с учетом характеристик инверторов и обычных устройств, таких как устройства регулирования под нагрузкой (РПН) и банки шунтирующих конденсаторов. Механизм запуска событий использовался для быстрого

го реагирования на большие отклонения уровня напряжения с целью уменьшения количества необходимых управляющих воздействий. Интеграция управления напряжением на базе инвертора в предлагаемой двухступенчатой архитектуре позволила обеспечить быстрый и непрерывный отклик на отклонения уровня напряжения. Данный метод позволил дополнительно уменьшить количество срабатываний коммутационного оборудования в процессе контроля уровня напряжения.

Для поддержания заданных параметров частоты и напряжения на зажимах вентильного генератора может быть предложена схема, которая позволяет работать ГПА с переменной частотой вращения турбины (рис. 2). На выходе СГ 1 установлен выпрямитель 2, который преобразует электрическую энергию переменного тока в постоянный ток. Для выравнивания пульсаций напряжения на выходе выпрямителя применен сглаживающий фильтр 3.

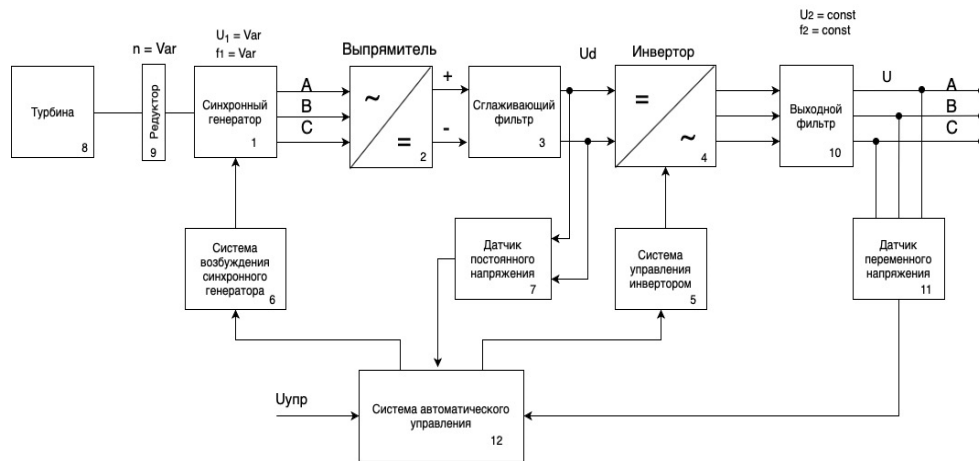


Рис. 2. Функциональная схема системы стабилизации напряжения:

1 – синхронный генератор, 2 – выпрямитель, 3 – сглаживающий фильтр, 4 – инвертор, 5 – система управления инвертором, 6 – система возбуждения синхронного генератора, 7 – датчик постоянного напряжения, 8 – турбина, 9 – редуктор, 10 – выходной фильтр, 11 – датчик переменного напряжения, 12 – система автоматического управления

Fig. 2. A functional diagram of the voltage stabilization system:

1 is a synchronous generator, 2 is a rectifier, 3 is a smoothing filter, 4 is an inverter, 5 is an inverter control system, 6 is a synchronous generator excitation system, 7 is a dc voltage sensor, 8 is a turbine, 9 is a reduction unit, 10 is an output filter, 11 is a ac voltage sensor, 12 is an automatic control system

Постоянное напряжение U_d с помощью инвертора 4 преобразуется в трехфазное переменное напряжение. Частота f_2 и величина U_2 этого напряжения задаются системой управления инвертором 5. Для обеспечения качества электрической энергии на электроприемниках ГПА необходимо поддерживать в заданных пределах значения частоты f_2 и величины напряжения U_2 при возможных вариациях частоты f_1 и величины напряжения U_1 на выходе СГ. Решение поставленной задачи осуществляет система автоматического управления, которая на основе информации о величинах постоянного напряжения U_d и переменного напряжения U_2 вырабатывает управляющие

воздействия для системы возбуждения синхронного генератора 6 и системы управления инвертором 5. Частота f_2 выходного напряжения в предлагаемой системе не зависит от параметров нагрузки. В работах [9–11] уже предлагалось адаптивное регулирование мощности через регулирование частоты, но в предлагаемых решениях основная проблема состоит в зависимости частоты выходного напряжения от потребляемой мощности, что не позволяет использовать эту схему в промышленных масштабах.

Номинальные данные СГ компании MarelliMotori, используемого в данном схемотехническом решении, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Параметры синхронного генератора

Synchronous generator parameters

Номинальная мощность, кВА	Напряжение U , В U , V	Ток I , А I , A	Частота f , Гц f , Hz	Количество оборотов n , об/мин n , rev/min	Коэффициент мощности $\cos \varphi$	Напряжение возбуждения U_B , В U_e , V	Ток возбуждения I_B , А I_e , A	Масса m , кг m , kg
300	380	456	50	1500	0,8	14	3,5	1450

Также распространение получила трехфазная мостовая схема выпрямителя (схема Ларионова) [12, 13]. Она состоит из двух трехфазных однополупериодных схем выпрямления, питающихся от одного источника питания и работающих на общую нагрузку. Это решение представляет собой мостовые выпрямители, каждые пары трехфазных обмоток которого работают на общую нагрузку. Такое решение уже находило применение ранее [14]. Соединяя в себе достоинства мостового выпрямителя и трехфазного источника питания, данное решение имеет достаточно низкий уровень пульсаций, что позволяет работать без сглаживающего конденсатора [15]. Недостатками такого устройства является увеличенное количество вентиля, что приводит к повышенной стоимости устройства и усложнения схемотехнического решения в целом.

Частотные преобразователи – необходимый элемент в плавном регулировании скорости синхронного двигателя. Также он применяется в различных разработках и схемах управления асинхронным двигателем [16].

Для сглаживания пульсаций напряжения на выходе выпрямителя устанавливают фильтр, который должен обеспечивать передачу постоянной составляющей уровня напряжения в нагрузку без потерь, а также иметь большую величину сопротивления на частотах гармонических составляющих выпрямленного напряжения. Этим требованиям вполне удовлетворяет фильтр, построенный на реактивных элементах – дросселе и конденсаторе. При инвертировании постоянного тока в переменный в преобразователях частоты используются транзисторы в переключающем режиме, а также инверторы с широтно-импульсной модуляцией [17].

Дискретный аналог непрерывной ШИМ – регулярно-дискретизированная ШИМ (скалярная ШИМ), которая легко реализуется с помощью аппаратных средств – как цифровых, так и аналоговых [18, 19]. Нередко разработ-

ки на основе ШИМ используются в регулировании асинхронных электроприводов [20, 21].

Выходное напряжение инвертора в общем случае имеет несинусоидальную форму. Она характеризуется коэффициентом гармоник по напряжению. Данные элементы позволяют контролировать и поддерживать на заданном уровне параметры частоты и напряжения системе электроснабжения цеха. В связи с большим числом элементов могут возникать гармоники разных порядков, большинство из которых будет активно подавляться при помощи ШИМ [22, 23].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ

На рис. 3 показана схема электроснабжения компрессорного цеха, которая построена на основе схмотехнического решения, изображенного на рис. 2.

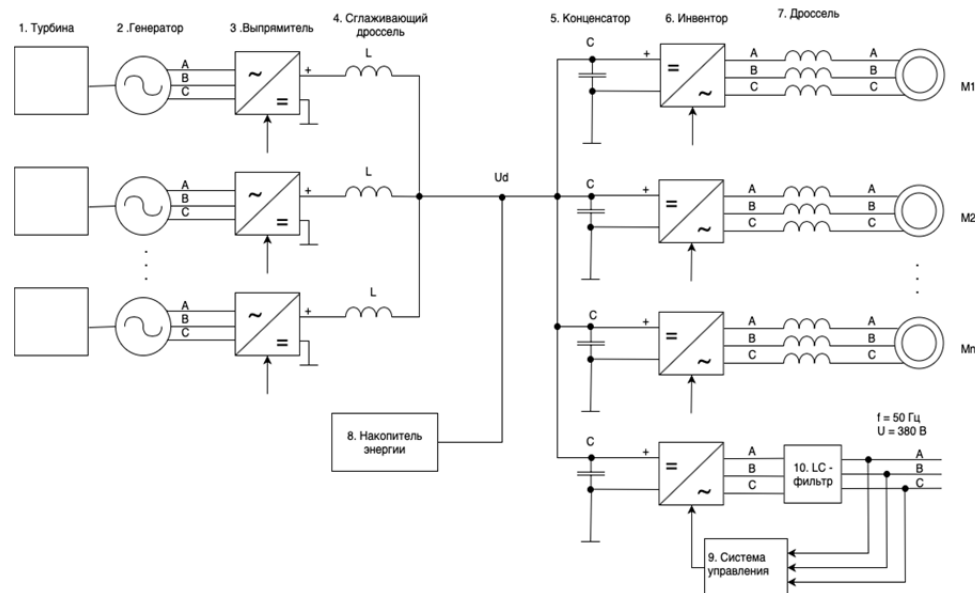


Рис. 3. Система электроснабжения на базе генераторов собственных нужд ГПА с объединенным звеном постоянного тока:

1 – турбина, 2 – генератор, 3 – выпрямитель, 4 – сглаживающий дроссель, 5 – конденсатор, 6 – инвертор, 7 – дроссель, 8 – накопитель электроэнергии, 9 – система управления, 10 – фильтр

Fig. 3. A power supply system based on GPU house generators with a unified dc link:

1 is a turbine, 2 is a generator, 3 is a rectifier, 4 is a smoothing-inductor, 5 is a capacitor, 6 is an inverter, 7 is a choke, 8 is an energy storage, 9 is a control system, 10 is a filter

Потоки электрической энергии, вырабатываемой генераторами 2 отдельных ГПА, суммируются на шине постоянного тока. К этой же шине подключен накопитель энергии 8, обеспечивающий требуемое качество электрической энергии в системе электроснабжения при существенных колебаниях нагрузки. К шинам постоянного тока подключены инверторы 6, управляющие работой электродвигателей 11, например, аппарат воздушного охлаждения газа (АВО). Электродвигатели подключены к инверторам через дроссели 7, что позволяет получить следующие результаты:

– подавление высокочастотных гармоник в токе двигателя, что позволяет формировать синусоидальный ток в обмотках двигателя с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ);

– ограничение амплитуды тока короткого замыкания происходит за счет присутствия индуктивностей в контуре, а при достижении током КЗ порога срабатывания защиты преобразователя частоты (ПЧ) двигатель обесточивается;

– снижение скорости нарастания аварийных токов короткого замыкания и задерживание момента достижения максимума тока обеспечивает необходимое время для срабатывания цепей электронной защиты ПЧ;

– осуществляется компенсация емкостных токов длинных кабельных линий, что препятствует ложным срабатываниям защиты ПЧ от сверхтоков.

Электрическая схема КЦ с ГПА, имеющими на валу синхронный генератор, приведенная на рис. 4, является одной из перспективных, так как суммарная мощность вспомогательного электрооборудования одного ГПА во много раз меньше мощности газовой турбины.

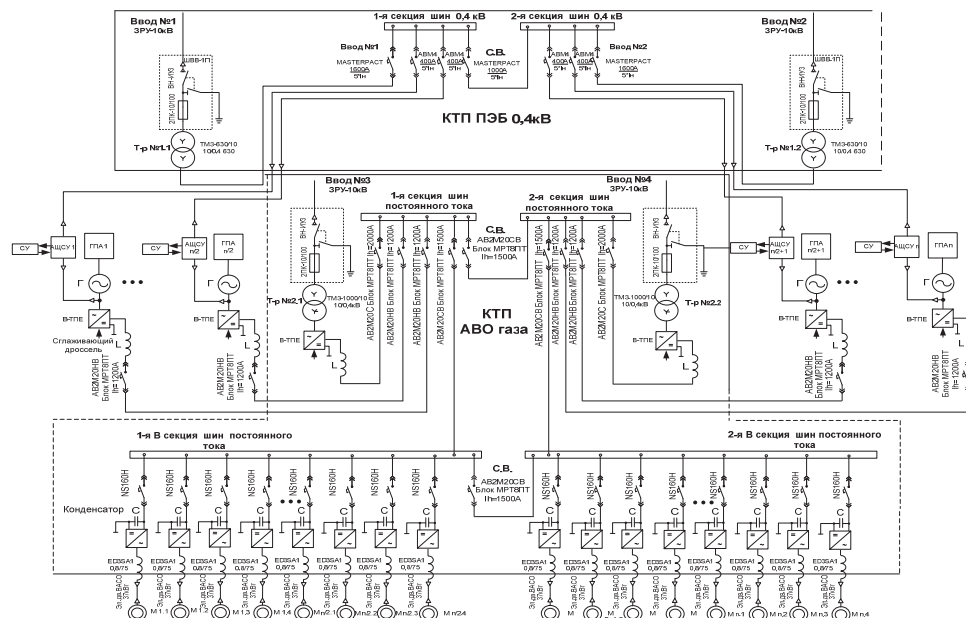


Рис. 4. Электрическая схема КЦ, оборудованного газотурбинными ГПА с генераторами на валу

Fig. 4. An electric circuit of a CS equipped with gas turbine GPU generators on the shaft

Поэтому колебания нагрузки генератора мало влияют на ее режим работы, который по условиям эксплуатации поддерживается близким к номинальному. Благодаря этому уменьшается удельный расход топлива ГПА.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Используя вышеперечисленные устройства и схемотехнические решения, можно добиться минимальных отклонений значений частоты и уровня напряжения. Предложенное решение позволяет обеспечить постоянный уро-

Окончание табл. 2

End of Tab. 2

Показатели Indicators	Год выпуска проекта Project released year					Итого, руб. Total cost, RUB
	2018 год 2018 year	2019 год 2019 year	2020 год 2020 year	2021 год 2021 year	2022 год 2022 year	
Капиталовложения, всего, тыс. руб., без НДС Total investment with- out tax, thousand RUB	11000,00	11000,00	11000,00	11000,00	11000,00	55000,00
Капиталовложения (оборудование), тыс. руб., без НДС Capital investment, thousand RUB	8800,00	8800,00	8800,00	8800,00	8800,00	44000,00
Капиталовложения (ПИР, СМР, ПНР), тыс. руб., без НДС Capital investment without tax, thousand RUB	2200,00	2200,00	2200,00	2200,00	2200,00	11000,00
Денежный поток, тыс. руб. Cash flow, thousand RUB	399456,00	6270,00	6270,00	6270,00	6270,00	424536,00
Коэффициент дискон- тирования Discount coefficient	0,88	0,78	0,69	0,61	0,54	X

Исходя из представленных данных табл. 2 можно заметить, что проект обеспечит положительный доход уже через 6–7 лет после внедрения, а окупаемость займет менее 10 лет. Эти экономические показатели подтверждают целесообразность представленного решения.

ВЫВОДЫ

Проблема стабилизации частоты и уровня напряжения решается уже на протяжении многих лет различными способами. Предложенное схмотехническое решение позволяет поддерживать требуемый уровень напряжения в изолированных энергосистемах независимо от типа величины нагрузки. Кроме того, в предложенной схеме стабилизации частоты и напряжения наблюдается существенный плюс в виде задержки нарастания токов короткого замыкания, в связи с чем у электронной защиты есть гораздо больше времени на срабатывание.

Таким образом, даже при повышении температуры окружающего воздуха, при падении мощности в КЦ будет сохраняться нужный режим работы газоперекачивающего оборудования, позволяя поддерживать нужное давление в магистральных газопроводах.

Также универсальность схемы позволит применять ее не только в описанном технологическом процессе, но и в других промышленных технологических процессах, где нагрузка может изменяться.

Благодаря улучшению качества электроэнергии оборудование не будет выходить из строя, что не позволит допустить нарушение работы ГПА, выбросы газа в воздух и т. д. Как было указано выше, универсальность схемы позволит применять ее и в других областях, таких как нефтяная промышленность. При постоянстве заданного качества электроэнергии поломки бурильных скважин будут происходить реже, что, соответственно, не будет приводить к экологическим катастрофам.

Не стоит ограничиваться перекачкой газа и добычей нефти, так как все области промышленности базируются на электроэнергии, и поддержание ее на должном уровне приведет к сохранению окружающей среды и эффективному использованию природных ресурсов.

Учитывая все плюсы и минусы данной схемы, рекомендуется рассмотреть ее как одну из внедряемых технологий в систему «Умная сеть».

В конце стоит подвести итоги.

1. Внедрение устройств, чьей задачей является стабилизация и регулирование частоты и напряжения вентильного генератора, позволяет повысить качество электроэнергии, что приведет к более надежной работе нагнетателей и соответственно к более успешной перекачке газа. Капитальные затраты в этом случае будут выше, но минимальные эксплуатационные затраты компенсируют это.

2. Оптимизация методов стабилизации напряжения приведет к экономии в процессе эксплуатации оборудования.

3. Схема имеет проблему с появлением гармоник, которая еще находится в процессе экономического решения.

Следует отметить, что проблема подавления высших гармоник решена в данной схеме посредством нивелирования нежелательных для эксплуатации гармоник кратных трем.

4. Автоматизация регулирования частоты вращения синхронного генератора является передовой разработкой на этапе переработки существующей системы управления в систему «Умной сети».

Учитывая свойства, полученные при создании данной схемы, и особенности работы данной схемы под различной нагрузкой, рекомендуется ее применение в различных областях промышленности начиная от газоперекачивающих механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2. Термодинамическая эффективность использования детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова, С.Н. Петин // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 6. – С. 961–968.

3. Крамской А.А., Филиппов А.В. Попутный газ последних ступеней сепарации. Компримирование низконапорного ПНГ // Территория Нефтегаз. – 2016. – № 3. – С. 78–83.

4. Makarov V.V., Kuznetsova O.P., Nikolaev M.Yu. The effect of electric exposure on the gas cleaning systems filter efficiency // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 12. – 2017. – Vol. 168, N 12. – P. 1–6. – DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012005.
5. Zbudskiy E.I., Balandina G.I. Automatic control system for power grid voltage stabilization // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 511–516.
6. Падалко Д.А. Стабилизация параметров напряжения асинхронного генератора, возбуждаемого инвертором напряжения // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 3 (35). – С. 9–16.
7. Колесников К.А. Методы повышения качества стабилизации в стабилизаторах напряжения в цепи постоянного тока // Молодежь: наука и творчество. – Ставрополь, 2017. – С. 316–319.
8. An event-trigger two-stage architecture for voltage control in distribution systems / C. Liu, X. Ma, M. Zhou, J. Wu, C. Long // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2018. – Vol. 95. – P. 577–584.
9. Lucas A., Chondrogiannis S. Smart grid energy storage controller for frequency regulation and peak shaving, using a vanadium redox flow battery // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2016. – Vol. 80. – P. 26–36.
10. Jamroen C., Namproom P., Dechanupaprittha S. TS-Fuzzy based adaptive PEVs charging control for smart grid frequency stabilization under islanding condition // Procedia Computer Science. – 2016. – Vol. 86. – P. 124–127.
11. High efficiency CMOS rectifier for energy harvesting / N.A. Wahab, M.K.M. Salleh, N. Othman, M.F.A. Khalid, N.M. Hidayat // 2016 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon). – Kota Kinabalu, Malaysia, 2016. – P. 123–127. – DOI: 10.1109/IEACON.2016.8067367.
12. Анализ режимов работы однофазного активного выпрямителя тока с широтно-импульсной модуляцией по прямоугольно-ступенчатому закону / О. Краснов, Б. Любарский, В. Божко, О. Петренко, О. Дубинина, Р. Нурiev // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2018. – Т. 3, № 9 (93). – С. 50–57.
13. Щербаков А.В., Стальков П.М. Разработка высоковольтного стенда для импульсных испытаний энергоёмких резисторов // Вестник МЭИ. – 2017. – № 2. – С. 88–95.
14. Брованов С.В., Харитонов С.А. Статические преобразователи электрической энергии на основе многоуровневых инверторов напряжения и выпрямителей с корректорами входного тока // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 2 (17). – С. 119–130.
15. Nidhal A., Dhia C., Lassad S. Modelling of conducted EMI generated by a three-phase PWM rectifier // 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS). – Hammamet, Tunisia, 2017. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/GECS.2017.8066163.
16. Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С. Принцип построения отказоустойчивой системы управления асинхронным приводом // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 105–109.
17. Горбунов Р.Л., Посконный Г.И. Исследование трехфазного широтно-импульсного преобразователя переменного напряжения для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 4. – С. 76–86.
18. Маклаков А.С. Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 92–100.
19. Nikolayev M.U., Nikolayeva E.V., Lyashkov A.A. Data measuring channels calibration procedure // 2016 IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, 2016. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819052.
20. Пустоветов М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного привода // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 4. – С. 87–95.
21. Баховцев И.А. Интегральные характеристики входного тока двухуровневых инверторов напряжения с ШИМ // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 111–118.

22. Герасимов В.А. Реализация цифрового ШИМ повышенной разрешающей способности с высокой несущей частотой на ПЛИС // Пром-Инжиниринг: труды III международной научно-технической конференции. – Челябинск, 2017. – С. 302–307.

23. Approximate discrete-time modeling of DC-DC converters with consideration of the effects of pulse-width modulation / X. Li, X. Ruan, Q. Jin, M. Sha, C.K. Tse // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Vol. 33, N 8. – P. 7071–7082. – DOI: 10.1109/TPEL.2017.2752419.

24. Tuballa M.L., Abundo M.L. A review of the development of Smart Grid technologie // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 59. – P. 710–725.

25. Использование нейронной сети для построения краткосрочного прогноза электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания» / В.И. Потапов, А.С. Грицай, Д.А. Тюньков, Г.Э. Сеницин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 8. – С. 44–51.

26. Smart Grid: assessment of the past and present in developed and developing countries / M.A. Ponce-Jara, E. Ruiz, R. Gil, E. Sancristóbal, C. Pérez-Molina, M. Castro // Energy Strategy Reviews. – 2017. – Vol. 18. – P. 38–52.

27. Климов П.Л., Разувец Е.А. Обзор управления умной сетью // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей 16 международной научно-практической конференции. – Пенза, 2018. – Ч. 1. – С. 81–83.

28. Цветков В.А. Smart Grid – Умная электрическая сеть // Science Time. – 2017. – Т. 40, № 4. – С. 218–220.

29. Пишеничников С.О. Технологии умных сетей Smart Grid для решения проблем современной энергетики // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск, 2017. – Т. 2. – С. 315–321.

30. Манусов В.З., Хасанзода Н., Ахъёев Д.С. Создание интегрированной системы электропитания острова Русский и управление ее режимами // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1–2. – С. 142–145.

Николаев Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – индукционно-импульсные волновые технологии. Имеет более 20 научных публикаций, соавтор одного патента. E-mail: munpr@yandex.ru

Макаров Владимир Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета информационных технологий и компьютерных систем Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – газовая динамика. Имеет более 80 научных публикаций. E-mail: kosmos070969@mail.ru

Кропотин Владимир Олегович, студент факультета элитного образования и магистратуры Омского государственного технического университета. Основное направление исследований – моделирование нагрева сухих трансформаторов и повышение пропускной способности ЛЭП с учетом температуры. Имеет более 20 научных публикаций. E-mail: kropotin_vl@mail.ru

Грицай Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – автоматизация бизнес-процессов энергосбытовых компаний, разработка и внедрение систем коммерческого учета электрической энергии, оптимизация электроэнергетических систем, включающих возобновляемые источники энергии. Имеет более 60 научных публикаций. E-mail: aleksandr.gri-say@gmail.com

Гаак Антон Викторович, советник генерального директора АО ОТЭК, исполнительный директор ООО «НИАР-Генерация» госкорпорации РОСАТОМ. Основное направление научных исследований – автоматизация бизнес-процессов энергетических предприятий, оптимизация теплоэнергетических процессов. Имеет более 10 научных публикаций. E-mail: vti2016@gmail.com

Nikolaev Mikhail Yuryevich, PhD (Eng.), an associate professor of Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is induction-pulse wave technology. He is the author of more than 20 publications, including co-author of 1 patent. E-mail: munnp@yandex.ru

Makarov Vladimir Vyacheslavovich, PhD (Eng.), an associate professor, dean at the information technology and computer systems department of Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is gas dynamics. He is the author of more than 80 publications. E-mail: kosmos070969@mail.ru

Kropotin Vladimir Olegovich, student at the elite education and magistracy department of Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is modeling the heating of dry transformers and increasing the transmission capacity of power lines taking into account temperature. He is the author of more than 20 publications. E-mail: kropotin_vl@mail.ru

Gritsay Alexander Sergeevich, PhD (Eng.), an associate professor at the informatics and computer engineering department of Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is the automation of business processes of energy retail companies, the development and implementation of systems for commercial accounting of electric energy, the optimization of electric power systems, including renewable energy sources. He is the author of more than 60 publications. E-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com

Gaak Anton Viktorovich, deputy general director of OTEC JSC – executive director of NIAR-Generation LLC, ROSATOM state corporation. The main direction of scientific research is automation of business processes of energy enterprises, optimization of heat and power processes. He is the author of more than 10 publications. E-mail: vti2016@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-161-176

Improvement of electric energy quality by regulating valve generators*

M.Yu. NIKOLAEV^{1,a}, *V.V. MAKAROV*^{1,b}, *V.O. KROPOTIN*^{1,c},
A.S. GRITSAY^{1,d}, *A.V. GAAK*^{2,e}

¹ Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

² United Heat Power Company JSC, 7 Pogorelsky Pereulok, Stroenie 2, Moscow, Russian Federation

^a munnp@yandex.ru ^b kosmos070969@mail.ru ^c kropotin_vl@mail.ru

^d aleksandr.gritsay@gmail.com ^e vti2016@gmail.com

Abstract

The relevance of the research is due to the ongoing technological revolution related to the digitization of the surrounding world. The use of numerous sensors in electrical systems leads to increased requirements for the quality of electricity in the electrical network. An increase in the number of analyzed data leads to a fundamentally new development of the electric power complex; predictive analytics increases the uptime of equipment, contributes to the growth of resource-saving technologies and minimizes voltage losses in the power supply networks of gas compressor units, as well as greatly reduces the cost of their maintenance. One of the ways to improve the quality and stabilize voltage in electrical networks is to use valve generators as an element of the “Smart Grid”.

The purpose of the research is to reduce the limits of voltage tolerance by stabilizing the output voltage using a circuit solution based on valve generators. The object of the research is compressor workshops, gas pumping units, valve generators and a set of voltage-stabilizing equipment.

* Received 11 May 2019.

The object of research is valve generators of gas pumping units installed in compressor workshops which serve to reduce the pressure of gas pumped through the main gas pipelines.

Research methods are based on an assessment of the effectiveness of technological solutions, including a systems analysis of the results of voltage stabilization of valve generators.

As a result of the research, a voltage stabilization scheme in networks using valve generators was developed, which allows achieving minimum voltage losses and frequency deviations, regardless of the type of load. The scheme has been successfully implemented in the compressor shop of the operating enterprise. The resulting scheme is recommended for application in the developed system “Smart Grid”.

Keywords: gas pumping unit, compressors, generators, voltage stabilization, operation regulation, smart grid, microgrid, voltage, energy system

REFERENCES

1. GOST 32144–2013. *Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.
2. Klimenko A.V., Agababov B.C., Borisova P.N., Petin S.N. Termodinamicheskaya effektivnost' ispol'zovaniya detander-generatornykh agregatov na stantsiyakh tekhnologicheskogo umen'sheniya davleniya transportiruemogo prirodnogo gaza [Thermodynamic efficiency of expander-generator units at the plants for technological decompression of transported natural gas]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, 2017, vol. 24, no. 6, pp. 961–968. (In Russian).
3. Kramskoy A.A., Filippov A.V. Poputnyi gaz poslednikh stupenei separatsii. Komprimirovanie nizkonapornogo PNG [Associated gas of last separation stages. Compression of low-pressure associated oil gas]. *Territoriya Neftegaz – Oil and Gas Territory*, 2016, no. 3, pp. 78–83.
4. Makarov V.V., Kuznetsova O.P., Nikolaev M.Yu. The effect of electric exposure on the gas cleaning systems filter efficiency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 12*, 2017, vol. 168, no. 12, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/168/1/012005.
5. Zabudskiy E.I., Balandina G.I. Automatic control system for power grid voltage stabilization. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 103, pp. 511–516.
6. Padalko D.A. Stabilizatsiya parametrov napryazheniya asinkhronnogo generatora, vzbuzhdaemogo invertorom napryazheniya [Stabilization of voltage parameters of induction generator excited by a voltage inverter]. *Problemy regional'noi energetiki – Problems of the Regional Energetics*, 2017, no. 3 (35), pp. 9–16.
7. Kolesnikov K.A. Metody povysheniya kachestva stabilizatsii v stabilizatorakh napryazheniya v tsepi postoyannogo toka [Method for improving the quality of stabilization in voltage stabilizers in a DC circuit]. *Molodezh': nauka i tvorchestvo* [Science and creativity], Stavropol', 2017, pp. 316–319.
8. Liu C., Ma X., Zhou M., Wu J., Long C. An event-trigger two-stage architecture for voltage control in distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2018, vol. 95, pp. 577–584.
9. Lucas A., Chondrogiannis S. Smart grid energy storage controller for frequency regulation and peak shaving, using a vanadium redox flow battery. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, vol. 80, pp. 26–36.
10. Jamroen C., Namproom P., Dechanupaprittha S. TS-Fuzzy based adaptive PEVs charging control for smart grid frequency stabilization under islanding condition. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 86, pp. 124–127.
11. Wahab N.A., Salleh M.K.M., Othman N., Khalid M.F.A., Hidayat N.M. High efficiency CMOS rectifier for energy harvesting. *2016 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon)*, Kota Kinabalu, Malaysia, 2016, pp. 123–127. DOI: 10.1109/IEACon.2016.8067367.
12. Krasnov O., Liubarskiy B., Bozhko V., Petrenko O., Dubinina O., Nuriiev R. Analiz rezhimov raboty odnofaznogo aktivnogo vypryamitelya toka s shirotno-impul'snoi modulyatsiei po pryamougol'no-stupenchatomu zakonu [Analysis of operating modes of single-phase current-source rectifier with rectangular-stepped pulse-width modulation]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 3, no. 9 (93), pp. 50–57.

13. Shcherbakov A.V., Stal'kov P.M. Razrabotka vysokovol'nogo stenda dlya impul'snykh ispytaniy energoemkikh rezistorov [Development of a high-voltage bench for impulse tests of high-energy resistors]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2017, no. 2, pp. 88–95.
14. Brovanov S.V., Kharitonov S.A. Statische preobrazovateli elektricheskoi energii na osnove mnogourovnevnykh inverterov napryazheniya i vypryamitelei s korrektorami vkhodnogo toka [Static electric energy converters based on multilevel voltage inverters and rectifiers with input current correctors]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2004, no. 2 (17), pp. 119–130.
15. Nidhal A., Dhia C., Lassad S.. Modelling of conducted EMI generated by a three-phase PWM rectifier. *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, Hammamet, Tunisia, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/GECS.2017.8066163.
16. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S. Printsip postroeniya otkazoustoichivoi sistemy upravleniya asinkhronnym privodom [The method of building a fault-tolerant asynchronous drive control system]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 105–109.
17. Gorbunov R.L., Poskonny G.I. Issledovanie trekhfaznogo shirotno-impul'snogo preobrazovatelya peremennogo napryazheniya dlya povysheniya energoeffektivnosti asinkhronnykh dvigatelei [Investigation of three-phase AC voltage converter, used for increasing energy efficiency of induction motors]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 76–86.
18. Maklakov A.S. Gibridnyi algoritm modulyatsii na osnove prostranstvenno-vektornoi ShIM i ShIM s udaleniem vydelennykh garmonik [Hybrid modulation based on SHEPWM and SVPWM]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika – Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 92–100.
19. Nikolayev M.U., Nikolayeva E.V., Lyashkov A.A. Data measuring channels calibration procedure. *2016 IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819052.
20. Pustovetov M.Yu. Opyt razrabotki sinus-fil'tra dlya silovoi skhemy chastotno-reguliruemogo asinkhronnogo privoda [Experience in developing sine-wave filter for power circuit of VVVF-drive with induction motor]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 87–95.
21. Bakhovtsev I.A. Integral'nye kharakteristiki vkhodnogo toka dvukhurovnevnykh inverterov napryazheniya s ShIM [Input current integral characteristics of two-level voltage source inverters with PWM]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (38), pp. 111–118.
22. Gerasimov V.A. [FPGA-based implementation of high resolution, high carrier frequency pulse-width modulator]. *Prom-Inzhiniring: trudy III mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [The 3rd International Conference on Industrial Engineering 2017]*. Chelyabinsk, 2017, pp. 302–307. (In Russian).
23. Li X., Ruan X., Jin Q., Sha M., Tse C.K. Approximate discrete-time modeling of DC-DC converters with consideration of the effects of pulse-width modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 8, pp. 7071–7082. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2752419.
24. Tuballa M.L., Abundo M.L. A review of the development of Smart Grid technologie. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 59, pp. 710–725.
25. Potapov V.I., Gritsay A.S., Tyunkov D.A., Sinitin G.E. Ispol'zovanie neuronnoi seti dlya postroeniya kratkosrochnogo prognoza elektropotrebleniya OOO "Omskaya energosbytovaya kompaniya" [Using neural network for building short term forecast of electricity load of LLC Omsk energy retail company]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 44–51.
26. Ponce-Jara M.A., Ruiz E., Gil R., Sancristóbal E., Pérez-Molina C., Castro M. Smart Grid: assessment of the past and present in developed and developing countries. *Energy Strategy Reviews*, 2017, vol. 18, pp. 38–52.
27. Klimov P.L., Razumets E.A. [Smart network management]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statei 16 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Fundamental and applied research: current issues, developments and innovations]*, Penza, 2018, pt. 1, pp. 81–83. (In Russian).
28. Tsvetkov V.A. Smart Grid – Umnaya elektricheskaya set' [Smart Grid]. *Science Time*, 2017, vol. 40, no. 4, pp. 218–220. (In Russian).

29. Pshenichnikov S.O. [Smart grid systems to solve the problems of modern energy]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Materials of All-Russia scientific and practical conference with international participation "Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia"], Irkutsk, 2017, vol. 2, pp. 315–321. (In Russian).

30. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Ahyoev J.S. Sozdanie integrirovannoi sistemy elektroobrazovaniya ostrova Russkii i upravlenie ee rezhimami [Creation of an integrated system of power supply for the Russian Island and management of its regimes]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2017, no. 1–2, pp. 142–145.

Для цитирования:

Повышение качества электроэнергии путем регулирования вентильных генераторов / М.Ю. Николаев, В.В. Макаров, В.О. Кропотин, А.С. Грицай, А.В. Гаак // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 4 (77). – С. 161–176. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-161-176.

For citation:

Nikolaev M.Yu., Makarov V.V., Kropotin V.O., Gritsay A.S., Gaak A.V. Povyshenie kachestva elektroenergii putem regulirovaniya ventil'nykh generatorov [Improvement of electric energy quality by regulating valve generators]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 4 (77), pp. 161–176. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-161-176.

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>.