НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 3 (72) **2018**

УДК 681.51(06)
Н 76

Редакционная коллегия

Главный редактор

Денисов Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Лемешко Борис Юрьевич, 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 Бриллард, д-р, проф., Университет Мюлуза, Франция
Алексеенко Сергей Владимирович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск
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
Лупи Серджио, д-р, проф., Падуанский университет, Италия
Лисицина Лилия Ивановна, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Мухопад 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 Тудевдагва, 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: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, VII корп., ком. 409, 417
Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/
Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

16+

УДК 681.51(06)

© Коллектив авторов, 2018
© Новосибирский государственный технический университет, 2018

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 3 (72) **2018**

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Гергет О.М., Мещеряков Р.В. Применение информационных методов, нейронных сетей и генетического алгоритма для решения задачи выбора схемы лечения 7

Величко А.Н., Будков В.Ю., Карпов А.А. Исследование методов классификации для автоматического определения истинной или ложной информации в речевых сообщениях 21

Воевода А.А., Романников Д.О. Синтез нейронной сети для реализации рекуррентного метода наименьших квадратов 33

Воробьев В.И., Солдаткина А.А. Метод онтологического анализа web-ресурса на основе метаданных 43

Имангазиева А.В. Компенсация возмущений в задаче робастного управления сетью объектов с распределенным и дискретным запаздыванием 59

Кориков А.М., Нгуен А.Т. Нейро-нечеткая классификация объектов и их состояний 73

Мезенцев Ю.А., Эстрайх И.В. Эффективный параметрический алгоритм оптимизации расписаний параллельных систем с заданным расписанием начала обслуживания.. 87

Царев И.В. Система имитационного моделирования динамических автоматных сетей 107

Шумская О.О., Будков В.Ю. Сравнительное исследование методов классификации в стегоанализе цифровых изображений 121

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Заикин А.Д. Модернизация ртутного поромера AutoPore III 135

ЭНЕРГЕТИКА

Григорьева О.К., Францева А.А., Боруш О.В. Исследование технико-экономических показателей системы комбинированного теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами 145

Джононаев С.Г. Ликвидация неустойчивых однофазных коротких замыканий в транспонированных линиях в цикле ОАПВ с использованием автоматического шунтирования фазы 157
Манусов В.З., Хасанзода Н., Бобоев Ш.А. Исследование оптимальных режимов интеллектуальных сетей с двухсторонним потоком энергии..... 175
Машкин А.Г., Машкина С.Ю. Энергетические процессы в простейшей электрической цепи 191

Правила для авторов..... 203

Корректор *Л.Н. Киншт*
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.
Журнал реферирован в ВИНИТИ (http: //www.2.viniti.ru)
Лицензия ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 17.09.2018.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 17,85. Печатных листов 12,75. Издательский № 226. Заказ № 1461.
Цена договорная

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

SCIENCE BULLETIN OF THE NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISSN 1814-1196

№ 3 (72) **2018**

УДК 681.51(06)
Н 76

Editorial board

Chief editor

Denisov V. I., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Lemeshko B. Yu., 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
Alekseenko S. V., D. Sc. (Phys. & Math.), Institute of Thermophysics, Novosibirsk, RF
Virolainen V. M., professor, Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Finland
Voronin V. V., D. Sc. (Eng.), Pacific national University, Khabarovsk, RF
Voropay N. I., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Eng.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Voskoboinikov Yu. E., D. Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF
Gaiduk A. R., D. Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF
Gozbenko V. E., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Grigor'ev Yu. D., D. Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF
Zinoviev G. S., D. Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Kryukov A. V., D. Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Lupi Sergio, D. Sc. (Eng.), Universita 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 Institut 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 Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
e-mail: nauchvest@corp.nstu.ru

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

УДК 681.51(06)

© Authors, 2018
© Novosibirsk State Technical University, 2018

SCIENCE BULLETIN OF THE NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISSN 1814-1196

№ 3 (72) **2018**

CONTENTS

INFORMATICS, COMPPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Gerget O.M., Meshcheryakov R.V. Applying information methods, neural networks and genetic algorithms for solving the problem of selecting a scheme of treatment 7

Velichko A.N., Budkov V.Y., Karpov A.A. Study of classification methods for automatic truth and deception detection in speech 21

Voevoda A.A., Romannikov D.O. Synthesis of a neural network for the implementation of the recursive least-squares method..... 33

Vorobyev V.I., Soldatkina A.A. Method of ontological analysis of a web-resource based on metadata 43

Imangazieva A.V. Compensation of disturbances in the problem of robust control of a plant network with distributed and discrete delays 59

Korikov A.M., Nguyen A.T. A neuro-fuzzy classification of objects and their states 73

Mezentsev Yu.A., Estraykh I.V. An efficient parametric algorithm for optimal scheduling of unrelated parallel machines with release dates..... 87

Tsarev I.V. A system for simulation modeling of dynamic automata networks 107

Shumskaya O.O., Budkov V.Y. Comparative study of classification methods in the stego-analysis of digital images 121

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASUREMENT DEVICES AND SYSTEMS

Zaikin A.D. AutoPore III mercury porosimeter upgrading 135

POWER ENGINEERING

Grigorieva O.K., Frantseva A.A., Borush O.B. Study of technical and economic performance of the combined heat supply system with freon thermal transformers..... 145

Jononaev S.G. Elimination of unstable single-phase short-circuits in transposed lines in the SPAR cycle using automatic phase shunting 157
Manusov V.Z., Khasanzoda N., Boboev Sh.A. Research on optimal modes of intelligent networks with a two-way energy flow 175
Mashkin A.G., Mashkina S.Yu. Energy processes in the simplest electrical circuit..... 191

Rules for authors..... 203

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.
Journal referenced in VINITI (http://www.2.viniti.ru)
License ID 04303 from 20.03.2001. Signed in print 17.09.2018. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 17,85. printed pages 12,75.
Publishing number 226. Order number 1461.

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

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 7–20

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 7–20

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS, COMPPUTER ENGINEERING AND CONTROL

УДК 004.93'12

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-7-20

Применение информационных методов, нейронных сетей и генетического алгоритма для решения задачи выбора схемы лечения*

О.М. ГЕРГЕТ[1, a], Р.В. МЕЩЕРЯКОВ[2, b]

[1] *634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Томский политехнический университет*
[2] *117997, РФ, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

[a] *olgagerget@mail.ru* [b] *meshcheryakov.roman@gmail.com*

Разработка информационных технологий мониторинга развивающихся биосистем, основанных на применении бионических принципов, является одним из перспективных научных направлений. Эволюционируя в течение миллионов лет, в биосистемах сформировались структуры, в частности генетическая, иммунная, нейронная, обеспечивающие сбалансированное развитие и наличие необходимых информационных средств контроля и адаптивного управления в изменяющейся среде. В настоящее время делаются попытки комплексного использования искусственных систем обработки информации, структурно отражающих функционирование биосистем. Особое внимание при этом уделяется разработке моделей и методов, всесторонне учитывающих специфику объекта исследования.

В статье рассмотрена концепция выбора последовательности управляющих воздействий с целью минимизации возможности перехода состояния организма в неблагоприятное. Для этого разработана бионическая модель, основанная на синтезе информационных подходов, нейронных сетей и генетического алгоритма. Синтез в бионических моделях нейронной, генетической и информационной систем позволил системам обмениваться информацией и передавать в качестве входных воздействий значения своих характеристик. Рассмотрены функционал каждого из элементов модели и их взаимодействие. Особое внимание уделено нейроэволюционному взаимодействию. Приведено краткое описание программного обеспечения, реализованного на языке программирования Python. На основе перекрестной проверки результатов тестирования машинного обучения выявлены аномалии, которые не были обнаружены ни одним из рассмотренных ранее методов. Эффективность решений, полученных на основе бионического моделирования, оценена на основе контрольно-тестовых групп и кросс-валидации. На основе результатов эксперимента показана эффективность выбора и применения управляющих воздействий с целью минимизации возможности перехода функционального состояния организма человека в неблагоприятное.

---

* *Статья получена 10 июля 2018 г.*

Исследование выполнено в ЮФУ при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-58-00226 и № 16-08-00013.

Ключевые слова: метод вычисления обобщенного показателя, информационный подход, нейронные сети, генетический алгоритм, бионическая модель, мониторинг, прогнозирование, выбор управляющих воздействий, здоровье

ВВЕДЕНИЕ

Во многих областях науки и производства достаточно часто возникает необходимость в решении задачи выбора наилучшего решения [1, 4, 10, 15, 16]. Широко применяемые методы математического программирования основываются на концепции использования заранее известных характеристик целевой функции, таких как выпуклость, вогнутость, монотонность и др. Однако при решении многих практических задач такие характеристики целевой функции неизвестны. В таком случае эффективными являются стохастические методы оптимизации, среди которых хорошо зарекомендовали себя генетические, муравьиные алгоритмы и др.

В статье освещается вопрос выбора наилучшей последовательности управляющих воздействий (схемы лечения) с целью минимизации риска перехода функционального состояния организма человека в неблагоприятное. Для этого предложена бионическая модель, основанная на взаимодействии информационного метода (*I*), генетического алгоритма (*GA*) и нейронных сетей (*NS*) [12].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Провести исследования, разработать и апробировать бионическую модель, позволяющую оценить эффект от применения управляющих воздействий как по статическим, так и динамическим переменным, на основе которой построить подсистему выбора последовательности управляющих воздействий в рамках информационной системы мониторинга, прогнозирования функционального состояния организма человека с учетом предложенной схемы лечения.

В статье под бионической моделью будем понимать математическую модель, а также ее программную реализацию, построенную по принципу функционирования и организации биосистем.

Для выбора наилучшего решения, проведения оценивания и прогнозирования эффекта от применения управляющих воздействий необходимо располагать адекватной математической моделью. Эту роль выполняет бионическая модель выбора последовательности управляющих воздействий вида

$$\langle NS,\ GA,\ I,\ A\rangle,$$

где *NS* – нейросетевые модели, *GA* – генетические алгоритмы, *I* – информационный метод вычисления обобщенного показателя биосистемы, *A* – алгоритмы настройки моделей.

Синтез информационных подходов, нейронных сетей и генетических алгоритмов в бионических моделях позволяет системам обмениваться информацией и передавать в качестве входных воздействий на другую подсистему значения своих характеристик, что повышает качество функционирования и интрепретируемость.

2. ИНФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

Применение информационного подхода в структуре бионической модели позволяет осуществить оценивание состояния организма в исследуемые моменты времени и выявить отклонения от референтного состояния. Интерес представляет формирование единого количественного показателя [2, 6], который бы позволил оценить реакцию целостного организма на изменения, происходящие под действием внутренней и внешней среды.

На основании реализации и анализа методов построения обобщенных оценок в информационной системе использован подход [3], в котором рассматривается информационная мера как мера предпочтительности поведения биообъекта.

Выбор обоснован анализом результатов, полученных с помощью:

1) интегрального критерия, в основе которого лежит оценка меры близости областей наблюдаемого и предпочтительного (референтного) состояний в пространстве признаков, где мера близости нормирована в метрике Махаланобиса на внутримножественное расстояние области референтного состояния [9];

2) интегрального критерия, в основе которого информационная мера Кульбака рассматривается как мера предпочтительности поведения биообъекта [3, 7];

3) энтропийного метода выявления реакции организма на воздействие [8].

3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ БИОНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

С целью прогноза значений признаков, характеризующих состояние биосистемы в динамике, а также функционального состояния организма при выборе того или иного управляющего воздействия в качестве базовой технологии в структуре бионической модели выбраны нейронные сети. Это обусловлено высокой эффективностью прогнозирования, возможностью реализации комитета моделей и использования рекурсивных нейронных сетей для вектора переменной структуры [5, 13].

Рассмотрим объект, функциональное состояние которого характеризуется информативными признаками x_i и способами воздействия на функциональное состояние организма $U = (u_1, ..., u_l)$, где l – количество управляющих воздействий.

Считаем, что значение i-го признака в момент времени $t+1$ определяется в соответствии с формулой $x_i(t+1) = f(x_i(t),\ x_i(t-1), ...,\ x_i(t-n), ...,\ u_j)$.

Задача сводится к решению задачи прогнозирования временного ряда. Для этого сформировано n нейронных сетей, каждая из которых описывает эффект лишь одного управляющего воздействия. Каждая из нейронных сетей принимает на вход только вектор показателей объекта исследования, а информация о типе моделируемого воздействия представлена во всех весовых

коэффициентах модели. Выходом нейронных сетей являются прогнозируемые значения как переменных, характеризующих состояние организма человека, так и обобщенных показателей.

Реализация алгоритмов прогнозирования осуществляется на основе рекуррентных динамических нейронных сетей (recurrent neural networks) [14–15, 17], посредством которых можно получить точную идентификацию поведения. Основным преимуществом использования данного подхода является реализация идеи «sequence-to-sequence learning», а именно вектор произвольной длины на входе и вектор произвольной длины на выходе.

4. ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И МИНИМИЗАЦИЯ РИСКА ПЕРЕХОДА В НЕБЛАГОПРИЯТНОЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ

Применение эволюционного подхода в структуре бионической модели дало возможность осуществлять поиск наиболее эффективных управляющих воздействий и оптимизировать гиперпараметры моделей.

Схема нейроэволюционного взаимодействия к формированию последовательности управляющих воздействий и определения эффективности лечения с целью минимизации отклонения состояния биосистемы от нормы представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схема эволюционного поиска управляющего воздействия

Fig. 1. A flow chart of an evolutionary search of a control action

В данном случае управляющие воздействия представлены в двух формах:

– при явном представлении управляющих воздействий хромосома строится из генов, каждый из которых определяет совокупность управляющих воздействий, применяемых к объекту исследования в некоторый момент времени;

– при неявном – хромосома определяется генами, характеризующими определенные свойства модели (количество слоев, нейронов в них, емкость краткосрочной памяти, степень связности сети, тип активационной функции, тип развертывания динамической сети и др.).

Функциональное состояние объекта в каждый момент времени характеризуется вектором признаков $X(t)=[x_1(t),\, x_2(t),...,\, x_n(t)]$ и обобщенным показателем $I(t)$, который является функцией от значений признаков. Кроме этого, для каждого объекта исследования заданы значения управляющего воздействия $U=\{u_1,\, u_2,...,\, u_l\}$. Считаем, что для заданного горизонта управления определены желаемые значения $I_{\text{кр}}(t),\ t\in[t_0,\, t_k]$ в каждый момент времени. Задана функция потерь [16], которая рассчитывается как разница между желаемым значением функционального состояния и реальным состоянием в определенный момент времени $C(t)=I_{\text{кр}}(t)-I(t)$.

5. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Обобщим и отметим функциональность каждого элемента бионической модели выбора последовательности управляющих воздействий.

Пусть имеется база данных, хранящая значения свойств объектов исследования в моменты времени: до применения некоторого управляющего воздействия и после.

1. Для каждого объекта исследования в каждый момент времени вычисляются значения обобщенного показателя и оцениваются их отклонения от нормы.

2. Эффект управляющего воздействия на каждый объект исследования моделируется посредством нейронной сети. В качестве входных данных используются значения переменных, характеризующих состояние объекта исследования до применения управляющего воздействия. В качестве желаемых откликов используются как значения переменных, так и значения обобщенного показателя (*I*) после применения управляющего воздействия. Минимизируемая целевая функция определяется как отклонение обобщенного показателя от нормы.

3. Полученное множество нейросетевых моделей формирует множество генов, которые могут быть заданы вектором параметров нейронных сетей (для неявной формы управляющего воздействия) и вектором логических переменных, в которых закодировано управляющее воздействие (при явной форме).

4. По известным предыдущим состояниям (переменным состояния) и прогнозным значениям переменных состояния с помощью генетического алгоритма определяется последовательность управляющих воздействий. В про-

цессе работы генетического алгоритма происходит запрос к нейронным сетям для получения прогнозных значений состояния на все будущие интервалы времени.

5. Генетический алгоритм посредством селекции, кроссинговера и мутации формирует и выбирает экземпляры нового поколения.

6. Значения фиттинг-функции генетического алгоритма определяются как отклонения прогнозируемого нейронной сетью (геном) значения обобщенного показателя от нормы. Среди множества управляющих воздействий, определяемых хромосомами, выбирается то, при котором значение фиттинг-функции будет минимальным (установлен диапазон [0,1; 1]).

6. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

На первом этапе разработки информационной системы с целью апробации возможности использования искусственных нейронных сетей для прогнозирования состояния здоровья беременных женщин и детей был разработан прототип, реализовавший следующий порядок действий:

1) загрузка таблицы с интегральными критериями по временным отсчетам;

2) разделение данных на обучающую и тестовую выборки по условиям кросс-валидации;

3) обучение нейронной сети с целью получения прогнозной интегральной оценки состояния здоровья пациента в следующий момент времени;

4) расчет ошибки прогноза;

5) оптимальный выбор гиперпараметров нейронной сети с помощью генетического алгоритма.

Результаты работы прототипа позволили оценить точность данного подхода и сделать вывод о необходимости разработки программного комплекса на основе выбранных алгоритмов.

Разработка прототипа производилась в пакете Matlab версии R2008b.

В качестве основного средства разработки выбран высокоуровневый язык программирования Python, относящийся к свободно распространяемому программному обеспечению. Программа на Python состоит из главного модуля и второстепенных, которые можно подключить при выполнении кода главного модуля. В качестве второстепенных модулей используются:

- NumPy – интерполяция данных, статистические функции, оптимизированные вычисления;
- Pandas – структуры данных (dataframe), чтение и сохранение *.csv-файлов;
- PyBrain – искусственные нейронные сети, методы оптимизации, в том числе генетический алгоритм;
- PyQt – компоненты графического интерфейса.

Выбранный инструментарий позволяет достаточно быстро перейти от этапа выработки прототипа к реализации готового программного проекта.

Весь процесс разделим на несколько этапов: сбор первичных данных и вторичных данных, полученных по результатам дополнительного обследования, на основе которого система рассчитывает показатели здоровья организма; анализ полученных показателей экспертом; постановка диагноза; форми-

рование схемы лечения. В системе осуществляется расчет интегральных показателей на основе энергоинформационного подхода. На экран выводится график адаптационных возможностей. С помощью кубического сплайна осуществляется интерполяция данных и расчет темпов изменения переменных, характеризующих функциональное состояние здоровья, производится определение типа адаптации, рассчитываются показатели эластичности, степени напряжения и функциональных резервов организма пациента. В дальнейшем определяется принадлежность пациента к одной из групп.

Рассчитываются прогнозные значения как каждого из признаков в отдельности, так и дается прогнозная интегральная оценка функционального состояния в период лечения либо после его окончания. Определяется отклонение между прогнозным и референсным значениями в каждый момент времени. Формируется схема лечения на основе выбора управляющих воздействий, при которых отклонение минимально.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация информационной системы на основе бионической модели проводилась на данных, характеризующих состояние беременных женщин в течение трех триместров беременности. Под наблюдением находилось 210 беременных женщин. Контролем служили здоровые беременные женщины (54 чел.), которым не оказывался комплекс управляющих воздействий. В первую группу (группа сравнения) входили женщины (48 чел.), у которых к 20-й неделе беременности была выявлена анемия, женщины не получали комплекс коррекционных мероприятий; во вторую группу (основная группа) – женщины с анемией, в комплекс терапии которых входили управляющие воздействия. Данная группа разбита на три подгруппы в соответствии с типом управляющих воздействий.

Оценка функционального состояния и эффективности лечения беременных женщин осуществлялась на основе реализации алгоритма построения обобщенных оценок, где информационная мера рассматривается как мера предпочтительности поведения биообъекта.

В таблице приведены результаты эксперимента, позволяющие по обобщенным оценкам провести исследование эффективности выбора последовательности управляющих воздействий.

Динамика состояния здоровья беременных женщин, в анамнезе которых диагностирована анемия

Dynamics of the state of health of pregnant women with anemia in their anamneses

УВ	Группа контроля		Основная группа (УВ № 1)			Основная группа (УВ № 2)		
	Н	К	Н	К	Нп	Н	К	Нп
До лечения	93 %	7 %	80 %	16 %	4 %	78 %	20 %	2 %
После лечения	84 %	16 %	76 %	24 %	–	92 %	8 %	–

Примечание. В таблице приведены сокращения: Н – норма, К – компенсация, Нп – напряжение состояния организма.

Обобщенная оценка динамики исследуемых показателей в контрольной группе указывает на физиологические изменения в организме здоровой беременной женщины. Положительная динамика значений обобщенного показателя получена в основной группе № 2 с воздействием, что свидетельствует о том, что включение в лечебный комплекс препарата железа, аквагимнастики и дыхательной гимнастики обусловило оптимизацию протекания восстановительных процессов и функционирования механизмов энергопродукции в организме беременных.

Для каждой из исследуемых групп рассматривается набор переменных, из которых на основе кросс-валидации формируются обучающая и тестовая выборки. Выбор управляющих воздействий осуществляется на основе результатов, полученных линейной регрессией и нейроэволюционным методом.

Работа генетического алгоритма осуществляется по следующей схеме.

При исследовании процесса выбора последовательности управляющих воздействий на основе генетического алгоритма формировались популяции размером 20, 30, 50, 70 и 100 особей. С целью увеличения стабильности результатов размер популяции составил 70 особей; вероятность кроссинговера $P_c = 0{,}7$; вероятность мутации $P_m = 0{,}1$ при условии, что отмеченный ген заменяется на ген из обучающей выборки, который еще не был представлен в популяции.

- При явном представлении управляющего воздействия хромосома состоит из семи генов (семи временных срезов), длина гена равна 3.
- При неявном представлении управляющего воздействия хромосома состоит из семи генов, длина гена равна 48.

Параметры нейронной сети: 2 скрытых слоя (1-й слой – 5 нейронов; 2-й слой – 2 нейрона), $p = 7$, $q = 1$, где p – количество временных задержек, q – количество обратных связей.

На рис. 2, 3 представлены результаты тестов (ошибка тестирования) при кросс-валидационном подходе. Подтверждением независимости результатов, представленных на рис. 2, 3, от случайной инициализации весовых коэффициентов является тот факт, что для каждого случая кросс-валидации генерировалось 50 наборов начальных весов, использовавшихся для независимо обучаемых моделей.

Анализ результатов показал, что обобщенный показатель состояния организма человека позволяет более точно прогнозировать эффект управляющего воздействия, чем критерий, основанный на расстоянии Махаланобиса. При вычислении отклонения значения признака от границ интервала достигается большая адекватность машинного обучения, чем при использовании отклонения от равновесных значений признаков в контрольной группе.

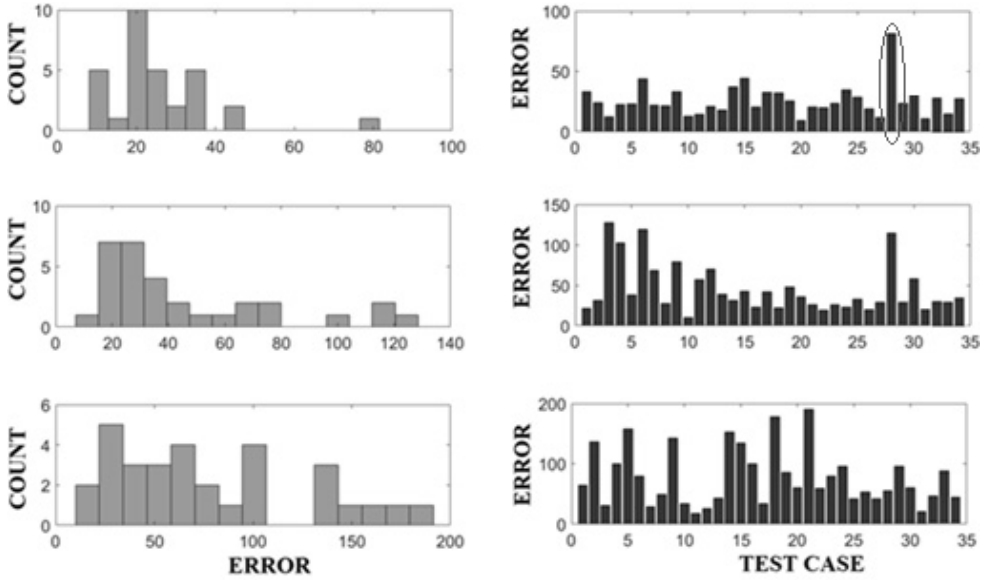


Рис. 2. Ошибка прогноза по результатам линейной регрессии для 2-й группы при следующих показателях:

а – обобщенный показатель, полученный на основе оценки предпочтительности состояния биосистемы, где величина отклонения переменных, характеризующих состояние объекта исследования, от равновесного (δ) рассчитана от верхней и нижней границ нормы (MAPE: 22; STD: 12); *б* – обобщенный показатель, где δ рассчитано от среднестатистических значений для контрольной группы (MAPE: 19; STD: 21); *в* – интегральный критерий, основанный на оценке близости наблюдаемого и предпочтительного состояний (MAPE: 38; STD: 27)

Fig. 2. A forecasting error based on the results of linear regression for 2 groups when:

a – is an overall index obtained based on the preference judgment of a biosystem where the value of deviation of variables which characterize the subject of research as compared to equilibrium (δ) is calculated from the upper and lower boundary of the norm (MAPE: 22; STD: 12); *b* – is an overall index where δ is calculated based on statistically average values for the control group (MAPE: 19; STD: 21); *c* – is an integral criterion based on the closeness estimate of the and preferable states (MAPE: 38; STD: 27).

В результате перекрестной проверки были обнаружены аномалии, которые не могли быть надлежащим образом исследованы ни одной из моделей. Отметим, что как модель нейронной сети, так и линейная регрессионная модель показали наибольшую ошибку на одном и том же элементе 2-й группы – 28-й объект (рис. 2, 3), который заслуживает особого внимания врачей. Большое количество экспериментов с различными параметрами модели показало, что этот объект исследования обладает уникальными свойствами переменных TF и TFRC. Даже при наиболее эффективной схеме лечения баланс железа в организме не восстанавливался.

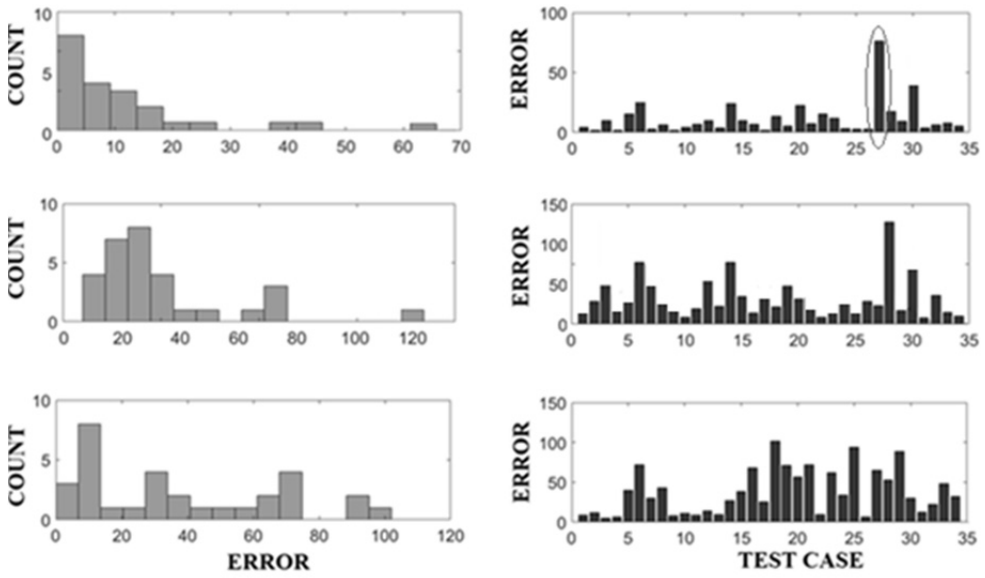


Рис. 3. Ошибка прогноза по результатам машинного обучения для 2-й группы при следующих показателях:

а – обобщенный показатель, полученный на основе оценки предпочтительности состояния биосистемы, где величина отклонения переменных, характеризующих состояние объекта исследования, от равновесного (δ) рассчитана от верхней и нижней границ нормы (MAPE: 11; STD: 6); *б* – обобщенный показатель, где δ рассчитано от среднестатистических значений для контрольной группы (MAPE: 17; STD: 11); *в* – интегральный критерий, основанный на оценке близости наблюдаемого и предпочтительного состояний (MAPE: 25; STD: 23)

Fig. 3. A forecasting error based on the results of machine learning for 2 groups when:

a – is an overall index obtained based on the preference judgment of a biosystem where the value of deviation of variables which characterize the subject of research as compared to equilibrium (δ) is calculated from the upper and lower boundary of the norm (MAPE: 11; STD: 6); *b* – is an overall index where δ is calculated based on statistically average values for the control group (MAPE: 17; STD: 11); *c* – is an integral criterion based on the closeness estimate of the and preferable states (MAPE: 25; STD: 23).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка и апробация бионической модели на реальных данных, обучение которой осуществлялось при совместном использовании градиентных и бионических алгоритмов, позволили эффективно осуществлять выбор последовательности управляющих воздействий (в контексте медицинской задачи и комплекса корректирующих мероприятий). Успешный выбор параметров и гиперпараметров модели и алгоритма обучения позволил минимизировать риск отклонения между реальными и желаемыми обобщенными показателями, что дало возможность подобрать оптимальное управляющее воздействие на организм.

На основании перекрестных проверок результатов тестирования машинного обучения обнаружены аномалии. Большое количество экспериментов с различными параметрами модели позволило выявить особенности объектов

исследования, обладающих уникальными свойствами, что ранее не было выявлено ни одной из исследованных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика состояния человека: математические подходы / А.В. Богомолов, Л.А. Гридин, Ю.А. Кукушкин, И.Б. Ушаков. – М.: Медицина, 2003. – 464 с.

2. *Максимов И.Б., Столяр В.П., Богомолов А.В.* Прикладная теория информационного обеспечения медико-биологических исследований. – М.: Бином, 2013. – 312 с.

3. *Гергет О.М., Кочегуров А.И.* Использование энергетических и информационных показателей в оценке состояния функционирования медицинских систем // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 117–120.

4. Система поддержки принятия решений при назначении комплексов немедикаментозной реабилитации / И.В. Горбунов, А.А. Зайцев, Р.В. Мещеряков, И.А. Ходашинский // Медицинская техника. – 2016. – № 6 (300). – С. 23–26.

5. *Девятых Д.В., Гергет О.М., Михаленко И.В.* Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования развития перинатального поражения нервной системы // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16, № 8 (111). – С. 77–80.

6. Математическое и алгоритмическое обеспечение оценки состояния здоровья человека / Н.С. Козыренко, Р.В. Мещеряков, И.А. Ходашинский, Н.Ю. Ануфриева // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 2 (33). – С. 116–146.

7. *Кочегуров В.А., Гергет О.М., Константинова Л.И.* Модели закономерностей развития детей в раннем периоде и методы оценки их состояния // Проблемы информатики. – 2012. – № S3 (17). – С. 6–12.

8. Комплексный подход к оздоровлению беременных женщин / Т.С. Кривоногова, И.Д. Евтушенко, Н.А. Тренькаева, Л.К. Гладких, О.М. Гергет. – Томск: Томский гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2008. – 183 с.

9. *Фокин В.А.* Статистическое моделирование данных при оценке состояния биологических систем // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311, № 5. – С. 132–135.

10. *Юсупов Р.М., Ронжин А.Л.* От умных приборов к интеллектуальному пространству // Вестник Российской академии наук. – 2010. – Т. 80, № 1. – С. 45–51.

11. *Carmesin H.* Multilinear back-propagation convergence theorem // PhysicsLetters A. – 1994. – Vol. 188 (1). – P. 27–31.

12. *Gerget O.M.* Bionic models for identification of biological systems // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803, N 1. – P. 12–24.

13. *Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. – New York, NY: Springer, 2009. – 745 p.

14. *Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.* Deep learning. – MIT Press, 2016. – 800 p.

15. *Shcherbakov M., Kamaev V., Shcherbakova N.* Automated electric energy consumption forecasting system based on decision tree approach // 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control. – 2013. – Vol. 46, iss. 9. – P. 1027–1032.

16. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry information / M.A. Yurchenko, E.A. Kochegurova, A.S. Fadeev, A.Y. Piletskaya // Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management: proceedings of the International Conference on Engineering Technologies, Engineering Education and Engineering Management (ETEEEM 2014), China, November 15–16, 2014. – London: Taylor & Francis Group, 2015. – P. 847–851.

17. *Wang H., Song G.* Innovative NARX recurrent neural network model for ultra-thin shape memory alloy wire // Neurocomputing. – 2014. – Vol. 134. – P. 289–295.

Гергет Ольга Михайловна, кандидат технических наук, доцент, доцент отделения информационных технологий Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований: системный анализ, математическое моделирование, информационные технологии. Автор имеет более 100 публикаций, в том числе 2 монографии, 1 патент на изобретение. E-mail: olgagerget@mail.ru

Мещеряков Роман Валерьевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН. Основное направление научных исследований: системный анализ в информационной безопасности, обработка информации в интеллектуальных системах, информационные технологии. Автор имеет более 200 публикаций, в том числе 1 монографию, 3 патента на изобретения, 22 зарегистрированных информационных ресурса. E-mail: gerget@ tpu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-7-20

Applying information methods, neural networks and genetic algorithms for solving the problem of selecting a scheme of treatment[*]

O.M. GERGET[1, a], *R.V. MESHCHERYAKOV*[2, b]

[1] *Tomsk Polytechnic University, 30, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia*
[2] *V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya Street, Moscow 117997, Russia*

[a] *gerget@ tpu.ru* [b] *meshcheryakov.roman@gmail.com*

Abstract

Recently, bionic-based IT solutions for monitoring developing biosystems have become a promising scientific trend. Biosystems evolving over millions of years have formed structures, such as genetic, immune and neural systems that ensure their balanced development and the availability of the necessary information means to control and adaptively manage them in a changing environment. At the present time, attempts are made to use artificial information processing systems that structurally reflect the functioning of biosystems. Particular attention is paid to the development of models and methods that fully consider the specific nature of each research object.

The present study is aimed to consider ways to minimize the possibility of a human organism transition to an unfavorable state through the selection of control activities sequence. To solve the problem, we developed a bionic model based on combining information approaches, neural networks, and a genetic algorithm. The functions of the model elements and their interaction are considered in the paper. A special focus is on the neuro-evolutionary interaction. The description of the software implemented in the programming language Python is described. Test-control groups and cross-validations weres used to evaluate the effectiveness of solutions based on bionic modeling. It was experimentally proved that the proposed method is effective for selecting and applying control activities.

Keywords: calculation technique of a composite index, neural networks, genetic algorithm, bionic model, monitoring, forecast, control activities selection, health

[*] *Received 10 July 2018.*

The research was carried out in SFedU with a financial support of RFBR within research projects Nos. 16-58-00226 и № 16-08-00013.

REFERENCES

1. Bogomolov A.V., Gridin L.A., Kukushkin Yu.A., Ushakov I.B. *Diagnostika sostoyaniya cheloveka: matematicheskie podkhody* [Human diagnostics: mathematical approaches]. Moscow, Meditsina Publ., 2003. 464 p.

2. Maksimov I.B., Stolyar V.P., Bogomolov A.V. *Prikladnaya teoriya informatsionnogo obespecheniya mediko-biologicheskikh issledovanii* [Applied theory of information support of biomedical research]. Moscow, Binom Publ., 2013. 312 p.

3. Gerget O.M., Kochegurov A.I. Ispol'zovanie energeticheskikh i informatsionnykh pokazatelei v otsenke sostoyaniya funktsionirovaniya meditsinskikh sistem [The use of energy and information indicators when estimating the state of medical system functioning]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 117–120.

4. Gorbunov I.V., Zaitsev A.A., Meshcheryakov R.V., Khodashinsky I.A. Sistema podderzhki prinyatiya reshenii pri naznachenii kompleksov nemedikamentoznoi reabilitatsii [Decision support system for assigning non-medicamental rehabilitation complexes]. *Meditsinskaya tekhnika – Biomedical Engineering*, 2016, no. 6 (300), pp. 23–26. (In Russian).

5. Devyatykh D.V., Gerget O.M., Mikhalenko I.V. Primenenie iskusstvennykh neironnykh setei dlya prognozirovaniya razvitiya perinatal'nogo porazheniya nervnoi sistemy [Artificial neural network implementation for newborn nervous system perinatal damage diagnosing]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2013, vol. 16, no. 8 (111), pp. 77–80.

6. Kozyrenko N.S., Meshcheryakov R.V., Khodashinsky I.A., Anufrieva N.Yu. Matematicheskoe i algoritmicheskoe obespechenie otsenki sostoyaniya zdorov'ya cheloveka [Mathematical model and algorithms of people health evaluation]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2014, iss. 2 (33), pp. 116–146.

7. Kochegurov V.A., Gerget O.M., Konstantinova L.I. Modeli zakonomernostei razvitiya detei v rannem periode i metody otsenki ikh sostoyaniya [Mathematical models of child development in newborns and the methods of evaluation of their condition]. *Problemy informatiki – Problems of Informatics*, 2012, no. S3 (17), pp. 6–12.

8. Krivonogova T.S., Evtushenko I.D., Tren'kaeva N.A., Gladkikh L.K., Gerget O.M. *Kompleksnyi podkhod k ozdorovleniyu beremennykh zhenshchin* [An integrated approach to recovery of pregnant women]. Tomsk, TUSUR University Publ., 2008. 183 p.

9. Fokin V.A. Statisticheskoe modelirovanie dannykh pri otsenke sostoyaniya biologicheskikh sistem [Mathematical modelling of data to assess the State of biologicalsystems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 5, pp. 132–135.

10. Yusupov R.M., Ronzhin A.L. Ot umnykh priborov k intellektual'nomu prostranstvu [From smart devices to smart space]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk – Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 80, no. 1, pp. 45–51. (In Russian).

11. Carmesin H. Multilinear back-propagation convergence theorem. *Physics Letters A*, 1994, vol. 188 (1), pp. 27–31.

12. Gerget O.M. Bionic models for identification of biological systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, no. 1, pp. 12–24.

13. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. New York, NY, Springer, 2009. 745 p.

14. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. The MIT Press, 2016. 800 p.

15. Shcherbakov M., Kamaev V., Shcherbakova N. Automated electric energy consumption forecasting system based on decision tree approach. *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*, 2013, vol. 46, iss. 9, pp. 1027–1032.

16. Yurchenko M.A., Kochegurova E.A., Fadeev A.S., Piletskaya A.Y. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry information. *Engineering Technology,*

Engineering Education and Engineering Management : proceedings of the International Conference on Engineering Technologies, Engineering Education and Engineering Management (ETEEEM 2014), China, November 15–16, 2014. London, Taylor & Francis Group, 2015, pp. 847–851.

17. Wang H., Song G. Innovative NARX recurrent neural network model for ultra-thin shape memory alloy wire. *Neurocomputin*g, 2014, vol. 134, pp. 289–295.

Для цитирования:

Гергет О.М., Мещеряков Р.В. Применение информационных методов, нейронных сетей и генетического алгоритма для решения задачи выбора схемы лечения // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 7–20. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-7-20.

For citation:

Gerget O.M., Meshcheryakov R.V. Primenenie informatsionnykh metodov, neironnykh setei i geneticheskogo algoritma dlya resheniya zadachi vybora skhemy lecheniya [Applying information methods, neural networks and genetic algorithms for solving the problem of selecting a scheme of treatment]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 7–20. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-7-20.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 21–32

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 21–32

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS, COMPPUTER ENGINEERING AND CONTROL

УДК 001.891.573:004.934.2 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-21-32

Исследование методов классификации для автоматического определения истинной или ложной информации в речевых сообщениях*

А.Н. ВЕЛИЧКО [a], В.Ю. БУДКОВ [b], А.А. КАРПОВ [c]

199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я линия, 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

[a] *velichko.a.n@mail.ru* [b] *budkov@iias.spb.su* [c] *karpov@iias.spb.su*

В статье представлены результаты экспериментальных исследований методов обработки речевого сигнала для паралингвистического анализа ложных и истинных речевых высказываний. Рассмотрены системы для определения типа информации, предложенные как в рамках международных соревнований по компьютерной паралингвистике Computational Paralinguistic Challenge ComParE-2016, так и вне этих соревнований. Также приведено описание речевой и многомодальной баз данных, содержащих ложные и истинные высказывания на английском языке: Deceptive Speech Database, в записи которой участвовали студенты Университета Аризоны, действовавшие согласно сценарию, и Real-Life Trial Deception Detection Dataset, которая была собрана в Университете Мичигана с использованием записей открытых судебных слушаний. На основе анализа и сравнения различных подходов к выявлению ложных и истинных речевых сообщений были определены методы и их параметры, показавшие наилучшие результаты относительно базовой системы, предложенной организаторами соревнований (которая достигла результата распознавания по критерию невзвешенного среднего значения полноты UAR = 68,3 %). В результате объединения двух баз данных был получен более сбалансированный и разнообразный набор данных для обучения системы объемом в 1253 аудиозаписи. С использованием открытого программного обеспечения (Ffmpeg, Praat, openSMILE, WEKA) был разработан прототип системы автоматического определения ложной информации в речи. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании метода бэггинга совместно с методом *k* ближайших соседей (UAR = 71,0 %), отдельного метода *k* ближайших соседей (UAR = 70,4 %), а также метода классификации путем регрессии совместно с методом *k* ближайших соседей (UAR = 69,5 %). Разработанная система может быть полезна в правоохранительной и банковской сферах, при исследованиях с использованием полиграфа, для предотвращения «телефонного терроризма» и т. д.

Ключевые слова: компьютерная паралингвистика, речевые технологии, распознавание лжи в речи человека, машинное обучение, классификация, экспериментальные исследования, метод бэггинга, метод *k*-ближайших соседей

---

* *Статья получена 30 апреля 2018 г.*

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-37-60085 и № 18-07-01407), Совета по грантам Президента РФ (грант № МД-254.2017.8) и бюджетной темы (№ 0073-2018-0002).

ВВЕДЕНИЕ

Паралингвистика занимается изучением различных невербальных аспектов речи человека, таких как эмоции, интонации, психофизиологические состояния, особенности голоса человека и т. д. Эмоциональное состояние человека тесно связано с его физиологическим состоянием. Идея распознавания ложной информации по речевому сигналу опирается на гипотезу о том, что при произнесении лжи человек испытывает стресс, что отражается на изменении параметров его речи. Несмотря на то что существующие методы экспертного определения лжи с использованием аппаратного полиграфа являются достаточно популярными, они имеют ряд недостатков в связи с тем, что требует особых условий для работы – это распространяется как на рабочее место, так и на испытуемого. Стоит также отметить, что в различных культурах невербальные аспекты речи различаются [1]. Задача определения истинной или ложной информации в речевых сообщениях является актуальной, и многие современные исследования посвящены задаче разработки математического и программного обеспечения для автоматизированных систем распознавания лжи в речи человека. Автоматизированные методы и средства для анализа паралингвистических явлений в устной речи относятся к области компьютерной паралингвистики. В настоящее время наиболее распространенными методами моделирования и классификации являются искусственные нейронные сети, скрытые марковские модели, метод опорных векторов, последовательная минимальная оптимизация, метод *k* ближайших соседей, деревья принятия решений и др. [2].

1. ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛОЖНОЙ ИНФОРМАЦИИ В РЕЧИ

В последние годы было представлено несколько экспериментальных систем, целью которых было распознавание ложной информации в речи человека. Большая часть таких систем была представлена на соревнованиях по компьютерной паралингвистике (Computational Paralinguistic Challenge) ComParE-2016, которые проводятся в рамках международной конференции INTERSPEECH с 2009 года. В 2016 году впервые на соревнованиях была представлена тема распознавания лжи в речи, где в качестве показателей оценки работы методов использовалась невзвешенная средняя полнота (Unweighted Average Recall, UAR [3]). Формула UAR выглядит следующим образом:

$$\mathrm{UAR} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{K}\frac{\mathbf{A}_{ii}}{\sum_{j=1}^{K}\mathbf{A}_{ij}},$$

где A – это матрица спутывания, A_{ij} – количество объектов класса *i*, классифицированных как *j*, а *K* – количество классов.

Участие принимали 20 команд из разных стран мира. Многие работы были посвящены выбору и работе с аудиопризнаками. Так, авторы работы [4] определяли лингвистические составляющие, а в работе [5] использовались акустико-просодические, лексические, синтаксические, фонотактические и базовый набор признаков, предоставленный организаторами. С помощью них были получены результаты распознавания ложных сообщений UAR 74,9 % и 62,2 % соответственно.

Некоторые исследователи полагают, что ложь может быть определена с помощью эмоциональных признаков. К примеру, в работах [6, 7] исследовались такие параметры, как эмоциональная насыщенность речи (тембр голоса, темп речи, громкость речи), лексические, грамматические и синтаксические признаки. В работе [7] авторы использовали интенсивность / силу эмоции, валентность / тон, эмоциональную регуляцию. Для системы авторы совместили такие методы, как kNN (k-Nearest Neighbors), SVM (Support Vector Machines), SMO (Sequential Minimal Optimization), и добились полноты UAR = 68,9 %.

Авторы работы [8] исследовали информативные признаки, они предложили высокоуровневый набор признаков и совместили его с базовым, а в системе использовали методы SVM и SMO, добившись полноты UAR = 69,3 %. В работе [9] было предложено использовать векторы Фишера для описания низкоуровневых признаков в высказываниях, а также каскадную нормализацию и нейросети ELM (Extreme Learning Machine), получив результат распознавания лжи UAR = 66,6 %.

Авторы работы [10] для решения проблемы определения ложной информации в речи исследовали несколько подходов машинного обучения. Они использовали акустические и лексические признаки для обучения модели глубокого обучения и получили результат F1 = 63,9 % (F1-мера). При использовании метода случайного леса, который был обучен с использованием объединенных акустических и лексических признаков, была получена точность распознавания 76,1 % (precision).

Также известен ряд работ по определению лжи в речи, выполненных вне соревнований по компьютерной паралингвистике ComParE-2016. В работе [11] рассматривалась психологическая сторона лжи. Автор считает, что дикторы могут испытывать различные эмоции в зависимости от причин, по которым люди лгут. В исследовании использовались деревья решений и 20 перекрестных проверок (cross-validation), при этом был получен результат распознавания UAR = 70 %. В работе [12] изучались свойства речи и было выявлено, что при произнесении лжи заметно ускоряется темп речи, уменьшается время начала ответа и длительность хезитаций. Авторы работы [13] использовали дробное преобразование Фурье для получения признаков FrCC, модель линейного дискриминантного анализа и скрытые марковские модели, получив различные результаты распознавания ложной информации в речи мужчин и женщин – 71 % и 70,2 % соответственно. В работах [14, 15] авторы совместно с аудиопризнаками использовали метаинформацию о дикторе (пол, этническая принадлежность, личностные факторы, родной язык). В ходе испытаний авторы работы [14] получили результат 61 % при использовании метода Adaboost. При этом в работе [15] выявлено, что метод случайного леса оказался наиболее точным по сравнению с деревом решений и бэггингом, он показал результат UAR = 65,86 %.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ, СОДЕРЖАЩИХ ЛОЖНЫЕ РЕЧЕВЫЕ СООБЩЕНИЯ

В качестве данных, для экспериментальных исследований были выбраны две базы данных:

1) Deceptive Speech Database [16], которая была представлена на соревновании по компьютерной паралингвистике ComParE-2016;

2) Real-Life Trial Deception Detection Dataset [17], созданная ранее в Университете Мичигана.

Речевой корпус Deceptive Speech Database (DSD) был разработан в Университете Аризоны (США). Этот корпус содержит аудиозаписи общей длительностью 162 минуты речи на английском языке 72 различных дикторов. В записи аудиоданных принимали участие студенты университета, они были разделены на две группы, участники которых должны были играть роли, определенные сценарием. Роль лжецов играли участники первой группы, они «украли» вопросы и ответы для экзамена из компьютера на кафедре. Участники второй группы играли роль честных студентов, которые вернули документ в тот же кабинет. С каждым участником были проведены интервью, которые состояли из набора открытых вопросов, подразумевающих короткие ответы (в основном «да» или «нет»). Основные параметры этой базы представлены в табл. 1. Длительность отдельных высказываний информантов варьируется от 0,1 до 236 секунд.

Таблица 1

Table 1

Параметры речевого корпуса DSD

Parameters of the speech database DSD

Корпус	Обучение	Разработка	Тестирование
Кол-во дикторов (женщины, мужчины) (виновен, не виновен)	26 (11, 15) (14, 12)	23 (11, 12) (10, 13)	– – –
Кол-во аудиофайлов (виновен, не виновен) (ложные, истинные)	572 (308, 264) (182, 390)	487 (220, 267) (130, 357)	497 – –
Длительность взаимодействия (секунд) Среднее: мин.-макс.	7.6: 0.4…220	6.3: 1.1…236	6.5: 0.1...220
Длительность речевых сообщений (секунд) Среднее: мин.-макс.	5.1: 0.2...214	4.0: 0.1...227	3.8: 0.1...211
Кол-во фонем Среднее: мин.-макс.	32.2: 1...1480	24.5: 1...1330	23.9: 1...1268

Второй речевой корпус Real-Life Trial Deception Detection Dataset (RLTDDD) был создан в 2016 году в Университете Мичигана (США). Для сбора данных были использованы англоязычные ресурсы, предоставляющие записи судебных слушаний, на которых можно определить поведение человека при произнесении ложной и правдивой информации. На аудио- и видеозаписях были точно определены подсудимый и свидетель; достаточно четко видны их лица на протяжении большей части записи; качество видео достаточно хорошее, чтобы определить мимику; также качество аудиозаписей должно быть настолько хорошим, чтобы слышать голоса и понимать, что говорят люди. Аудио- и видеозаписи были отмечены экспертом как «лжи-

вые» и «правдивые» на основании вердикта суда: виновен, не виновен или оправдан. Если вердикт «виновен», то аудио- и видеозаписи, содержащие ложную информацию, состоят из записей подсудимых, а видео, содержащие правдивую информацию – из записей свидетелей в тех же слушаниях. База данных содержит 121 запись судебных заседаний, включая 61 лживую и 60 правдивых. Средняя продолжительность видеозаписи по всей базе данных составляет 28 сек., 27,7 сек. и 28,3 сек. для ложных и правдивых высказываний, соответственно. Данные включают аудио- и видеозаписи 21 женщины и 25 мужчин, возраст информантов находится между 16 и 60 годами.

3. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ

Общая схема разработанной программной системы для анализа речевой информации представлена на рис. 1. В экспериментальной системе используется следующее открытое программное обеспечение:

1) Ffmpeg – для записи, конвертирования, передачи цифровых аудио- и видеозаписей в различных форматах (https://www.ffmpeg.org/);

2) Praat – программное средство для фонетического анализа речи (http://www.fon.hum.uva.nl/praat/);

3) openSMILE – программный инструментарий для вычисления расширенного набора акустических низкоуровневых признаков (LLD), который состоит из 6373 супрасегментных признаков, включающих 65 базовых низкоуровневых признаков и их функционалы, эти низкоуровневые признаки включают в себя множество характеристик (спектральных, кепстральных, энергетических и вокализованных) (http://audeering.com/technology/opensmile/);

4) WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) – набор программных средств визуализации и методов для анализа данных, классификации и прогнозирования [18].

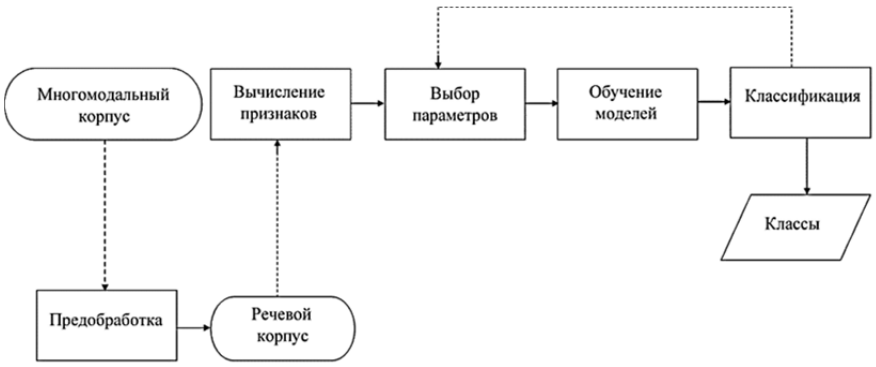


Рис. 1. Общая схема разработанной экспериментальной системы анализа аудиоданных

Fig. 1. A general diagram of the developed experimental system for the analysis of audio data

В данном исследовании проводится работа только с аудиоданными, которые были извлечены из многомодального корпуса RLTDDD. Далее они были обработаны при помощи Praat, где экспертом были вырезаны

фразы «интервьюеров». Таким образом было получено 195 аудиозаписей, которые были помечены согласно информации, представленной в аннотации к базе данных. Всего для исследования были использованы 1253 аудиозаписи.

Вычисление аудиопризнаков проводилось с использованием программного инструментария openSMILE (конфигурация набора признаков для соревнований по компьютерной паралингвистике ComParE 2013 года [19]). Выходными данными являются файлы формата Attribute-Relation File Format (ARFF), в которых сначала определяется тип загружаемых данных (метаданные), а потом указываются сами данные в виде векторов признаков.

На последнем этапе используется программный инструментарий классификации WEKA, куда загружаются признаки, вычисленные ранее. Для проведения экспериментов были выбраны следующие методы классификации данных, реализованные в WEKA: 1) SMO (Sequential Minimal Optimization) [20]; 2) kNN (k-Nearest Neighbor); 3) Bagging; 4) Decision Tree; 5) Random Forest; 6) Adaboost [21]; 7) SGD (Stochastic Gradient Descent) [22]; 8) OneR (One Rule); 9) PART (PART decision list) [23]; 10) Random Tree; 11) CvR (Classification via Regression) [24].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментов были использованы методы перекрестной проверки (N-fold cross-validation, в данном случае была выбрана 10-кратная перекрестная проверка) и межкорпусный анализ (cross-corpus analysis). Первый метод заключается в том, что исходная выборка N раз (N-fold cross-validation) разбивается на две подвыборки: обучающую и тестовую. Затем для каждого разбиения производится обучение модели, а точность классификации оценивается на объектах тестовой выборки и затем усредняется по всем N экспериментам. Был также использован межкорпусный анализ, т. е. обучение методов происходило на одной речевой базе, а тестировалось на другой.

В качестве показателей оценки работы методов использовалась точность распознавания (Accuracy) и невзвешенная средняя полнота UAR. Эта мера используется для данных с несбалансированными классами и является средним значением полноты, вычисляемым для каждого класса. Так, результаты перекрестной проверки представлены в табл. 2 (где Acc. – точность, UAR – полнота), а результаты межкорпусного анализа – в табл. 3.

В ходе перекрестной проверки в основном были использованы стандартные параметры методов классификации WEKA, однако после проведения дополнительных исследований параметры некоторых классификаторов (Bagging, CvR, Adaboost, kNN) были изменены (табл. 4).

Из табл. 2 можно видеть, что наилучшие результаты по критерию качества распознавания на совмещенном наборе данных показали следующие методы: бэггинг с методом k ближайших соседей (UAR = 71,0 %), затем метод k ближайших соседей, а также метод классификации путем регрессии с методом k ближайших соседей (UAR = 69,55 %).

Таблица 2

Table 2

Результаты сравнения методов паралингвистического анализа аудиоданных для распознавания истинности / ложности речевых сообщений

Results of comparison of paralinguistic analysis methods of audio data for the recognition of truth/deception of spoken messages

Метод	База данных DSD		База данных RLTDDD		Совместно DSD + RLTDDD	
	Acc., %	UAR, %	Acc., %	UAR, %	Acc., %	UAR, %
Bagging + kNN	70,3	66,8	76,3	76,2	72,8	71,0
kNN	70,4	67,0	76,3	76,3	71,4	70,4
CvR + kNN	70,4	67,0	76,3	76,3	71,4	69,6
Adaboost + SMO	76,4	68,4	69,0	68,9	71,9	68,5
SMO	76,4	70	69,0	68,9	71,9	68,5
SGD	76,3	70	66,5	66,4	71,8	68,3
Random Forest	72,5	55,2	79,4	79,3	71,4	59,6
Decision Tree	63,0	54,3	69,6	69,5	63,9	58,2
Random Tree	61,3	55,3	63,9	63,7	64,8	58,2
PART	64	56,2	66,5	66,4	63,6	58,2
OneR	65,2	51,8	74,7	74,6	59,4	50,5

Таблица 3

Table 3

Межкорпусный анализ

Database-to-database analysis

Метод	DSD → RLTDDD		RLTDDD → DSD	
	Acc., %	UAR, %	Acc., %	UAR, %
Bagging	48,5	50,0	60,1	50,6
kNN	42,3	42,2	52,9	47,2
CvR	50,0	50,9	67,9	48,6
Adaboost	47,4	50,0	69,6	54,9
SMO	52,0	53,8	58,9	49,2
SGD	46,4	48,7	54,4	49,4
Random Forest	46,4	48,9	49,0	44,4
Decision Tree	45,9	46,9	45,0	48,6
Random Tree	49,0	49,3	61,9	54,4
PART	46,9	48,9	42,3	47,7
OneR	47,9	49,8	55,7	47,7

Таблица 4

Table 4

Сравнение изменений в настройках методов классификации

Comparison of changes in settings of the classification methods

Метод классификации	Стандартные параметры	Измененные параметры
Bagging	Обучение на классификаторе REPTree	Обучение на классификаторе kNN
CvR	Обучение на классификаторе M5P	Обучение на классификаторе kNN
Adaboost	Обучение на классификаторе DecisionStump	Обучение на классификаторе SMO
kNN (в экспериментах с объединенными данными)	Количество *k* соседей = 1	Количество *k* соседей = 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты экспериментального исследования по автоматическому распознаванию истинной / ложной информации в речи. Для экспериментов были выбраны наиболее популярные и эффективные методы классификации и оптимизированы их параметры, при которых данные методы показывают наилучшую точность / полноту распознавания. Эксперименты проводились на материалах, представленных в двух речевых базах данных Deceptive Speech Database и Real-Life Trial Detection Deception Dataset. При этом для работы со вторым набором данных необходимо было предварительно извлечь аудиоданные из мультимедийного корпуса и разметить их.

Приведены результаты работы и сравнения методов классификации как отдельно на каждом наборе данных, так и на объединенном наборе. Наилучшие результаты по критерию качества распознавания на совмещенном наборе данных показали следующие методы: бэггинг с методом *k* ближайших соседей (UAR = 71,0 %), метод *k* ближайших соседей (UAR = 70,4 %), а также метод классификации путем регрессии с методом *k* ближайших соседей (UAR = = 69,55 %). Можно заметить, что объединение двух баз данных положительно сказалось на результатах классификации, поскольку удалось расширить и разнообразить обучающий набор.

Предложенный прототип программной системы в дальнейшем возможно использовать для автоматического распознавания правдивой / ложной информации в речи человека в таких сферах, как биометрические исследования на полиграфе, предотвращение телефонного «терроризма»; в банковской сфере в ходе проведения интервью для рассмотрения вопросов о выдаче кредитов и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Potapova R., Lykova O.* Verbal representation of lies in Russian and Anglo-American cultures // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2016. – Vol. 236. – P. 114–118.

2. *Величко А.Н., Будков В.Ю., Карпов А.А.* Аналитический обзор компьютерных паралингвистических систем для автоматического распознавания лжи в речи человека // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 5. – С. 30–41.

3. *Eyben F.* Real-time speech and music classification by large audio feature space extraction. – Springer, 2016. – 298 p.

4. *Montacié C., Caraty M.-J.* Prosodic cues and answer type detection for the deception subchallenge // Proceedings of INTERSPEECH-2016. – San Francisco, USA, 2016. – P. 2016–2020.

5. Combining acoustic-prosodic, lexical, and phonotactic features for automatic deception detection / S.I. Levitan, G. An, M. Ma, R. Levitan, A. Rosenberg, J. Hirschberg // Proceedings of INTERSPEECH-2016. – San Francisco, USA, 2016. – P. 2006–2010.

6. *Савченко В.В., Васильев Р.А.* Анализ эмоционального состояния диктора по голосу на основе фонетического детектора лжи // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – 2014. – № 21 (192). – С. 186–195.

7. Is deception emotional? An emotion-driven predictive approach / S. Amiriparian, J. Pohjalainen, E. Marchi, S. Pugachevskiy, B. Schuller // Proceedings of INTERSPEECH-2016. – San Francisco, USA, 2016. – P. 2011–2015.

8. *Herms R.* Prediction of deception and sincerity from speech using automatic phone recognition-based features // Proceedings of INTERSPEECH-2016. – San Francisco, USA, 2016. – P. 2036–2040.

9. *Kaya H., Karpov A.* Fusing acoustic feature representations for computational paralinguistics tasks // Proceedings of INTERSPEECH-2016. – San Francisco, USA, 2016. – P. 2046–2050.

10. Hybrid acoustic-lexical deep learning approach for deception detection / G. Mendels, S.I. Levitan, K. Lee, J. Hirschberg // Proceedings of INTERSPEECH-2017. – Stockholm, Sweden, 2017. – P. 1472–1476.

11. *Hirschberg J.* Detecting deceptive speech: requirements, resources and evaluation [Electronic resource] // Proceedings of LREC-2008. – Marrakech, Morocco, 2008. – URL: http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2008/keynotes/Hirschberg.pdf (accessed: 11.09.2018).

12. *Kirchhubel C., Stedmon A., Howard D.M.* Analyzing deceptive speech // Proceedings of EPCE-2013. – Heidelberg: Springer, 2013. – Pt. 1. – P. 134–141. – (Lecture notes in computer science; vol. 8019). – doi: 10.1007/978-3-642-39360-0_15.

13. *Pan X., Zhao H., Zhou Y.* The application of fractional Mel cepstral coefficient in deceptive speech detection [Electronic resource] // PeerJ. – 2015. – 18 August. – URL: https://doi.org/10.7717/peerj.1194 (accessed: 11.09.2018).

14. Identifying individual differences in gender, ethnicity, and personality from dialogue for deception detection / S.I. Levitan, Y. Levitan, G. An, M. Levine, A. Rosenberg, R. Levitan, J. Hirschberg // Proceedings of NAACL-HLT-2016. – San Diego, USA, 2016. – P. 40–44.

15. Cross-cultural production and detection of deception from speech / S.I. Levitan, G. An, M. Wang, G. Mendels, J. Hirschberg, M. Levine, A. Rosenberg // Proceedings of ACM Workshop on Multimodal Deception Detection. – Seattle, USA, 2015. – P. 1–8.

16. The INTERSPEECH 2016 Computational paralinguistics challenge: deception, sincerity & native language / B. Schuller, S. Steidl, A. Batliner, J. Hirschberg, J.K. Burgoon, A. Baird, A. Elkins, Y. Zhang, E. Coutinho, K. Evanini // Proceedings of INTERSPEECH-2016. – San Francisco, USA, 2016. – P. 2001–2005.

17. Deception detection using real-life trial data / V. Pérez-Rosas, M. Abouelenien, R. Mihalcea, M. Burzo // Proceedings of ACM International Conference on Multimodal Interaction. – Seattle, USA, 2015. – P. 59–66.

18. *Frank E., Hall M.A., Witten I.H.* The WEKA workbench: online appendix for "Data mining: practical machine learning tools and techniques". – 4th ed. – Burlington, MA: Morgan Kaufmann, 2016.

19. The INTERSPEECH 2013 Computational paralinguistics challenge: social signals, conflict, emotion, autism / B. Schuller, S. Steidl, A. Batliner, A. Vinciarelli, K. Scherer, F. Ringeval,

M. Chetouani, F. Weninger, F. Eyben, K. Marchi, M. Mortilliaro, H. Salamin, A. Polychroniou, F. Valente, S. Kim // Proceedings of INTERSPEECH-2013. – Lyon, France, 2013. – P. 148–152.

20. *Platt J.C.* Sequential minimal optimization: a fast algorithm for training support vector machines. Technical report MSR-TR-98-14. – Redmond: Microsoft Research, 1998. – 21 p.

21. *Freund Y., Schapire R.E.* A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting // Journal of Computer and System Sciences. – 1997. – Vol. 55. – P. 119–139.

22. *Kiefer J., Wolfowitz J.* Stochastic estimation of the maximum of a regression function // Annals of Mathematical Statistics. – 1952. – Vol. 23 (3). – P. 462–466.

23. *Frank E., Witten I.H.* Generating accurate rule sets without global optimization // ICML '98 Proceedings of the Fifteenth International Conference on Machine Learning. – San Francisco, CA, USA, 1998. – P. 144–151.

24. *Kukreja M., Johnson S.A., Stafford P.* Comparative study of classification algorithms for immunosignaturing data // BMC Bioinformatics. – 2012. – Vol. 13. – P. 139.

Величко Алёна Николаевна, программист лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Основное направление научных исследований – определение ложной информации в речи. Имеет 2 публикации. E-mail: velichko.a.n@mail.ru

Будков Виктор Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Основное направление научных исследований – многомодальные человеко-машинные интерфейсы, взаимодействие с роботами. Имеет более 50 публикаций. E-mail: budkov@iias.spb.su

Карпов Алексей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Основное направление научных исследований – разработка и исследования в области автоматического распознавания и понимания речи, аудиовизуальной обработки (анализ и синтез) речи, многомодальные человеко-машинные интерфейсы, компьютерной паралингвистики. Имеет более 250 публикаций. E-mail: karpov@iias.spb.su

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-21-32

Study of classification methods for automatic truth and deception detection in speech[*]

A.N. VELICHKO[a], *V.Y. BUDKOV*[b], *A.A. KARPOV*[c]

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), 39, 14th Line, St. Petersburg, Russia

[a] *velichko.a.n@mail.ru* [b] *budkov@iias.spb.su* [c] *karpov@iias.spb.su*

Abstract

In this paper we present experimental results of research on speech processing methods for paralinguistic analysis of deceptive and truthful speech utterances. It includes a short survey of recently developed deception detection systems that were used in the framework of the Computational Paralinguistics Challenge ComParE-2016 and in other situations. In addition, we present speech and multimodal databases that contain both truthful and deceptive utterances

[*] *Received 30 April 2018.*

The work was supported by the RFBR (projects № 16-37-60085 and №18-07-01407), as well as by the grant of the President of Russia (№ MD-254.2017.8) and state research (№. 0073-2018-0002).

in English: Deception Speech Database that was collected in the University of Arizona and consists of audio recordings of students' speech (they acted according to the scenario) and Real-Life Trial Deception Detection Dataset that was collected in the University of Michigan using recordings of real-life trial videos that are publicly available. Based on this analysis and comparison of several various methods with optimal parameters the best methods and parameters were found. These methods showed better results than the baseline system proposed for the competition (its performance in terms of Unweighted Average Recall measure UAR was 68.3 %).The dataset for training was obtained by combining both databases. Thereby it is more balanced and manifold (the total number of audio files was 1253). An automatic system for deception detection was developed using these methods and open source software (Ffmpeg, Praat, openSMILE, WEKA). The highest performance was obtained using a combination of Bagging and k-Nearest Neighbor classifiers with UAR = 71.0 %. Also, high results were obtained using a single k-Nearest Neighbor classifier (UAR = 70.4 %), and a combination of Classification via Regression with k-Nearest Neighbor classifiers (UAR = 69.5 %). The developed system may be used for law enforcement and banking areas, biometric research with polygraph devices, prevention of telephone terrorism, etc.

Keywords: Computational paralinguistics, speech technology, deception detection in speech, machine learning, classification, experimental study, bagging, k-Nearest Neighbor

REFERENCES

1. Potapova R., Lykova O. Verbal representation of lies in Russian and Anglo-American cultures. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2016, vol. 236, pp. 114–118.

2. Velichko A.N., Budkov V.Yu., Karpov A.A. Analiticheskii obzor komp'yuternykh paralingvisticheskikh sistem dlya avtomaticheskogo raspoznavaniya lzhi v rechi cheloveka. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy – Information and Control Systems*, 2017, vol. 90, no. 5, pp. 30–41.

3. Eyben F. *Real-time speech and music classification by large audio feature space extraction*. Springer, 2016. 298 p.

4. Montacié C., Caraty M.-J. Prosodic cues and answer type detection for the deception subchallenge. *Proceedings of INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2016–2020.

5. Levitan S.I., An G., Ma M., Levitan R., Rosenberg A., Hirschberg J. Combining acoustic-prosodic, lexical, and phonotactic features for automatic deception detection. *Proceedings of INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2006–2010.

6. Savchenko V.V., Vasil'ev R.A. Analiz emotsional'nogo sostoyaniya diktora po golosu na osnove foneticheskogo detektora lzhi [The analysis of the emotional condition of the an-nouncer on the voice on the basis of the phonetic lie detector]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta – Belgorod State University Scientific Bulletin*, 2014, vol. 21, no. 192, pp. 186–195. (In Russian).

7. Amiriparian S., Pohjalainen J., Marchi E., Pugachevskiy S., Schuller B. Is deception emotional? An emotion-driven predictive approach. *Proceedings of INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2011–2015.

8. Herms R. Prediction of deception and sincerity from speech using automatic phone recognition-based features. *Proceedings of INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2036–2040.

9. Kaya H., Karpov A. Fusing acoustic feature representations for computational paralinguistics tasks. *Proceedings of INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2046–2050.

10. Mendels G., Levitan S.I., Lee K., Hirschberg J. Hybrid acoustic-lexical deep learning approach for deception detection. *Proceedings of INTERSPEECH-2017*, Stockholm, Sweden, 2017, pp. 1472–1476.

11. Hirschberg J. Detecting deceptive speech: requirements, resources and evaluation. *Proceedings of LREC-2008*, Marrakech, Morocco, 2008. Available at: http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2008/keynotes/Hirschberg.pdf (accessed 11.09.2018).

12. Kirchhubel C., Stedmon A., Howard D.M. Analyzing deceptive speech. *Proceedings of EPCE-2013*. Heidelberg, Springer, 2013, pt. 1, pp. 134–141. doi: 10.1007/978-3-642-39360-0_15.

13. Pan X., Zhao H., Zhou Y. The application of fractional Mel cepstral coefficient in deceptive speech detection. *PeerJ*, 2015, 15 August. Available at: https://doi.org/10.7717/peerj.1194 (accessed 11.09.2018).

14. Levitan S.I., Levitan Y., An G., Levine M., Rosenberg A., Levitan R., Hirschberg J. Identifying individual differences in gender, ethnicity, and personality from dialogue for deception detection. *Proceedings of NAACL-HLT-2016*, San Diego, USA, 2016, pp. 40–44.

15. Levitan S.I., An G., Wang M., Mendels G., Hirschberg J., Levine M., Rosenberg A. Cross-cultural production and detection of deception from speech. *Proceedings of ACM Workshop on Multimodal Deception Detection*, Seattle, USA, 2015, pp. 1–8.

16. Schuller B., Steidl S., Batliner A., Hirschberg J., Burgoon J.K., Baird A., Elkins A., Zhang Y., Coutinho E., Evanini K. The INTERSPEECH 2016 Computational paralinguistics challenge: deception, sincerity & native language. *Proceedings of INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2001–2005.

17. Pérez-Rosas V., Abouelenien M., Mihalcea R., Burzo M. Deception detection using real-life trial data. *Proceedings of ACM International Conference on Multimodal Interaction*, Seattle, 2015, pp. 59–66.

18. Frank E., Hall M.A., Witten I.H. *The WEKA workbench: online appendix for "Data mining: practical machine learning tools and techniques"*. 4th ed. Burlington, MA, Morgan Kaufmann, 2016.

19. Schuller B., Steidl S., Batliner A., Vinciarelli A., Scherer K., Ringeval F., Chetouani M., Weninger F., Eyben F., Marchi K., Mortilliaro M., Salamin H., Polychroniou A., Valente F., Kim S. The INTERSPEECH 2013 computational paralinguistic challenge: social signals, conflict, emotion, autism. *Proceedings of INTERSPEECH-2013*, Lyon, France, 2013, pp. 148–152.

20. Platt J.C. *Sequential minimal optimization: a fast algorithm for training support vector machines. Technical report MSR-TR-98-14*. Redmond, Microsoft Research, 1998. 21 p.

21. Freund Y., Schapire R.E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of Computer and System Sciences*, 1997, vol. 55, pp. 119–139.

22. Kiefer J., Wolfowitz J. Stochastic estimation of the maximum of a regression function. *Annals of Mathematical Statistics*, 1952, vol. 23, no. 3, pp. 462–466.

23. Frank E., Witten I.H. Generating accurate rule sets without global optimization. *ICML '98 Proceedings of the Fifteenth International Conference on Machine Learning*, San Francisco, CA, USA, 1998, pp. 144–151.

24. Kukreja M., Johnson S.A., Stafford P. Comparative study of classification algorithms for immunosignaturing data. *BMC Bioinformatics*, 2012, vol. 13, p. 139.

Для цитирования:

Величко А.Н., Будков В.Ю., Карпов А.А. Исследование методов классификации для автоматического определения истинной или ложной информации в речевых сообщениях // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 21–32. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-21-32.

For citation:

Velichko A.N., Budkov V.Yu., Karpov A.A. Issledovanie metodov klassifikatsii dlya avtomaticheskogo opredeleniya istinnoi ili lozhnoi informatsii v rechevykh soobshcheniyakh [Study of classification methods for automatic truth and deception detection in speech]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 21–32. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-21-32.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 33–42

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 33–42

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 519.233.22 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42

Синтез нейронной сети для реализации рекуррентного метода наименьших квадратов*

А.А. ВОЕВОДА [a], Д.О. РОМАННИКОВ [b]

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

[a] *voevoda@ucit.ru* [b] *dmitry.romannikov@gmail.com*

В статье рассматривается синтез нейронной сети для решения задачи вычисления параметров P, K, θ статических объектов рекуррентным методом наименьших квадратов для скалярного случая. При этом структура нейронной сети получена из реализуемых соотношений, в которых каждая функция двух переменных аппроксимируется отдельной нейронной сетью. Для вычисления параметров K и P достаточно только аппроксимировать исходные соотношения, так как они сами зависят только от двух переменных (т. е. являются функциями двух переменных). Для вычисления параметра θ было необходимо представить исходное соотношение в виде функций двух переменных, а затем по отдельности построить нейронные сети для их аппроксимации и синтезировать итоговую нейронную сеть. Приведена структура синтезированной нейронной сети, основанная на использовании структуры для аппроксимации функции двух переменных, позволяющей рассчитать параметры нейронной сети и сумматоров, выполненных на нейронах. При этом часть связей является рекуррентной. Проведены эксперименты для подтверждения работы синтезированной нейронной сети для расчета заданных соотношений 1) при рассчитанных параметрах нейронной сети; 2) при параметрах нейронной сети, полученных путем обучения методом градиентного спуска обратного распространения ошибки для синтезированной структуры нейронной сети. Представлены графики, показывающие, что вычисленные с помощью синтезированной нейронной сети искомые параметры в достаточной степени соответствуют полученным в результате вычислений по исходным формулам значениям параметров в заданном диапазоне изменения водных переменных. Полученная нейронная сеть обладает такой же сходимостью, что и реализуемые соотношения.

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

* *Статья получена 10 мая 2018 г.*

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 объектов на изображениях [1], распознавания звуков и речи [2, 3], решения проблем, связанных с синтезом систем оптимального управления [4–6], и т. д. При этом решения каждой из вышеуказанных задач имеют общие недостатки, связанные с общими проблемами нейронных сетей: отсутствие однозначных рекомендаций по выбору структуры сети, типов нейронов, начальных параметров (более подробно рассмотрено в [7–11]). Кроме того, использование методов, основанных на градиентном спуске для оптимизации стоимостной функции в нейронных сетях, не гарантируют сходимость [7–9].

Преодоление вышеприведенных недостатков на практике достигается перебором различных вариантов архитектур, типов нейронов, начальных условий, методов обучения и дальнейшим выбором наиболее удачного решения. С другой стороны, в [12] представлен подход, в котором выполняется синтез нейронной сети, а также расчет параметров таким образом, что итоговая нейронная сеть не требует обучения. В [13, 14] представлен подход к синтезу нейронной сети на основании предварительно рассчитанной сети Петри. Также представлена статья, в которой предлагается метод синтеза для аппроксимации функций двух переменных. Ее особенностью является предлагаемая структура нейронной сети и способ расчета параметров нейронной сети. Данный метод был усовершенствован в части оптимизации количества нейронов в нейронной сети и в части масштабирования предлагаемого метода для произвольного количества входных переменных.

Во всех вышеприведенных работах синтезируемые нейронные сети являлись сетями прямого распространения, т. е. не было примеров синтеза рекуррентных нейронных сетей.

Использование многослойного персептрона несколько затруднено для решения данной задачи. К примеру, обучение нейронной сети для расчета параметра K в [15] из одного входного слоя, трех скрытых слоев и одного выходного слоя (число нейронов по слоям: 1, 5, 4, 3, 1 соответственно) с линейными функциями активации методом градиентного спуска и стоимостной функцией суммы квадратов ошибки не всегда выполняется, а приводит к расхождению.

В настоящей статье показывается применение методики синтеза нейронных сетей для решения задачи вычисления параметров статических объектов рекуррентным методом наименьших квадратов [15] для скалярного случая.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье рассматривается задача синтеза нейронной сети для вычисления параметров статических объектов рекуррентным методом наименьших квадратов [15] для скалярного случая $y = \theta x$, т. е. вычисления θ_{N+1}, K_{N+1}, P_{N+1}:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{N+1} = \hat{\theta}_N + K_{N+1}\left(y_{N+1} - x_{N+1}\hat{\theta}_N\right), \\ K_{N+1} = P_N x_{N+1} / (1 + x_{N+1} P_N x_{N+1}), \\ P_{N+1} = \left(1 - P_N \dfrac{x_{N+1} x_{N+1}}{1 + x_{N+1} P_N x_{N+1}}\right) P_N. \end{cases}$$

В данной системе уравнений θ_N, K_N, P_N, x_N, y_N являются скалярами; x – входной переменной; y – выходной переменной; x_N, y_N – обозначают N-е измерение; параметры θ_N, K_N, P_N – вычисляемые параметры, из которых K_N, P_N являются вспомогательными переменными, с помощью которых оценивается параметр θ_N.

Синтезируемая нейронная сеть должна состоять только из нейронов и дифференцируемых функций активаций (т. е. для итоговой нейронной сети должно быть возможным обучение одним из градиентных методов обратного распространения ошибки). В качестве функции активации будет использоваться функция выпрямителя (*rectifier*) – *relu*.

2. СИНТЕЗ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Так как реализуемые соотношения из раздела постановки задачи являются рекуррентными, то очевидно, что и нейронная сеть для их реализации должна иметь обратные связи (т. е. являться рекуррентной), что поднимает вопрос об их устойчивости при обучении [7, 8].

Уравнения для решения соотношений для расчета P_{N+1}, K_{N+1} являются уравнениями двух переменных и могут быть аппроксимированы[1,2,3]. Для аппроксимации уравнения при расчете θ_{N+1} можно представить уравнение в виде выражений функций двух переменных, а далее суммировать полученный результат. Блок-схема последовательности вычисления приведена на рис. 1. Эта блок-схема является основной структурой синтезируемой нейронной сети.

На рис. 1 функции $F_1 - F_4$ являются функциями двух переменных, аппроксимация которых приведена в статьях[1,2,3]. Более детально ее структура изображена на рис. 2, 3, а коэффициенты получены путем обучения одним из методов градиентного пуска. Пунктиром выделены соответствующие исходным выражениям части блок-схемы.

---

[1] *Voevoda A.A., Romannikov D.O.* Approximations of two-dimensional surfaces using neural networks // The 13th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2018) : proc., Harbin, China, 30 May – 1 June 2018.

[2] *Voevoda A.A., Romannikov D.O., Troshina G.V.* The Method of Synthesis of a Neural Network for the Approximation of Surfaces of Two Variables // The XXI International Conference on Soft Computing and Measurement (SCM'2018) : proc., St. Petersburg, Russia, May 23–25 2018.

[3] *Voevoda A.A., Romannikov D.O.* Synthesis of a Neural Network for N-Dimension Surfaces Approximation // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018).

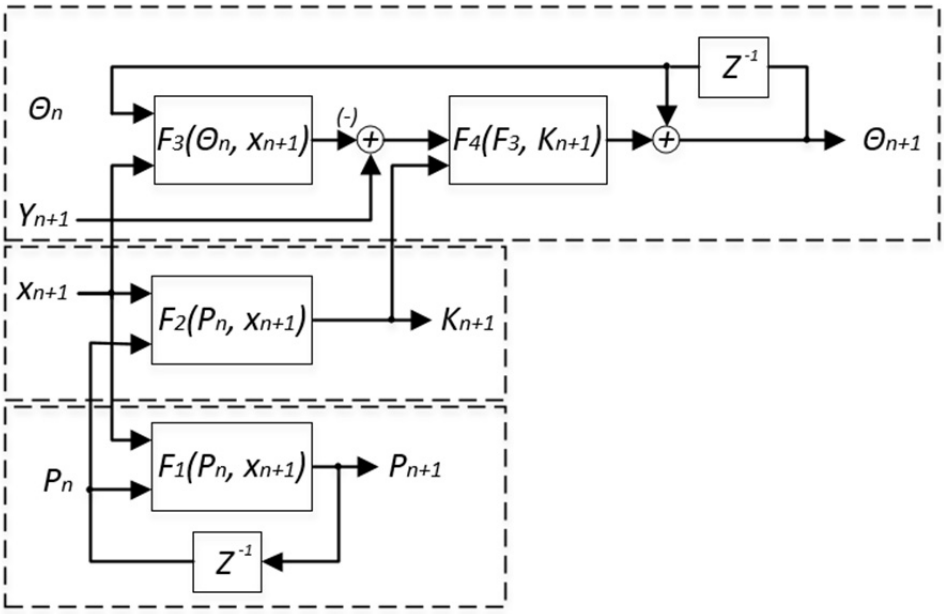


Рис. 1. Блок-схема алгоритма вычислений рассматриваемых соотношений

Fig. 1. The block diagram of the computation algorithm of relationships under study

На рис. 2 приведена часть нейронной сети, где кругами обозначены нейроны. Первые расположенные параллельно четыре нейрона с функцией активации выпрямителя (*relu*) необходимы для построения трапеции, с помощью которой выделяется поддиапазон входной координаты. Далее фигурой трапеции обозначается данная часть нейронной сети (рис. 3). Выходной нейрон необходим для суммирования выходных значений нейронов первого слоя. Его выходное значение символизирует то, что значение входной переменной принадлежит поддиапазону. Например, если x_1 имеет значение 0.7, а нейронная сеть на рис. 2 «улавливает» поддиапазон от 1 до 2, то на выходе будет значение, близкое к нулю, а если x_1 будет принадлежать рассматриваемому поддиапазону, то близкое к единице.

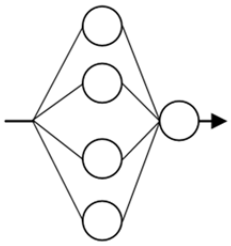


Рис. 2. Структура нейронной сети для выделения признака принадлежности к поддиапазону

Fig. 2. The neural network structure to extract the attribute of the membership to the sub-band

Диапазон каждого значения входной переменной x_1, x_2 разбивается на поддиапазоны, и определяется принадлежность значения входной переменной одному из поддиапазонов (второй слой, рис. 2). Третий слой формируется путем пересечения каждого из выходных нейронов поддиапазона одной размерности (например, x_1) с каждым из выходных нейронов поддиапазона следующей размерности (например, x_2).

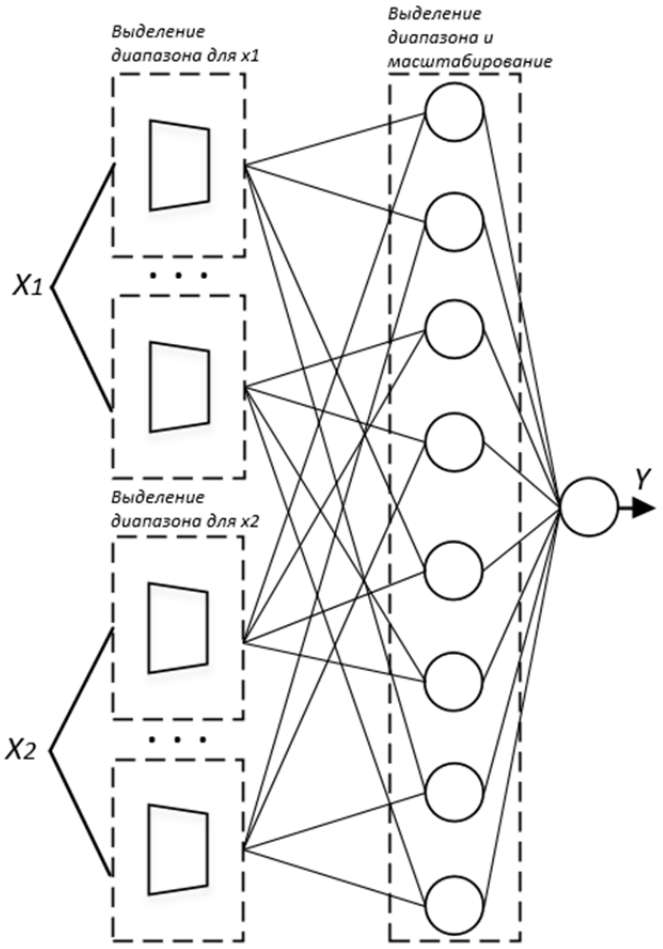


Рис. 3. Структура нейронной сети для аппроксимации функций $F_1 - F_4$

Fig. 3. The neural network structure to approximate the $F_1 - F_4$ functions

В четвертом слое выполняется объединение значений поддиапазонов по логической функции «и» для определения итогового поддиапазона. В последнем слое выполняется суммирование выходных значений предыдущего слоя. Особенностью данной структуры является то, что коэффициенты данной нейронной сети можно получить как путем градиентного обучения, так и расчетом.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

При моделировании значения переменных x_{N+1} и y_{N+1} изменялись по функции $f(x) = \sin(x)$. Таким образом, значение коэффициента θ должно сходиться к единице.

Результаты значений, полученных нейронной сетью и рассчитанных по формальным выражениям из постановки задачи, приведены на рис. 4.

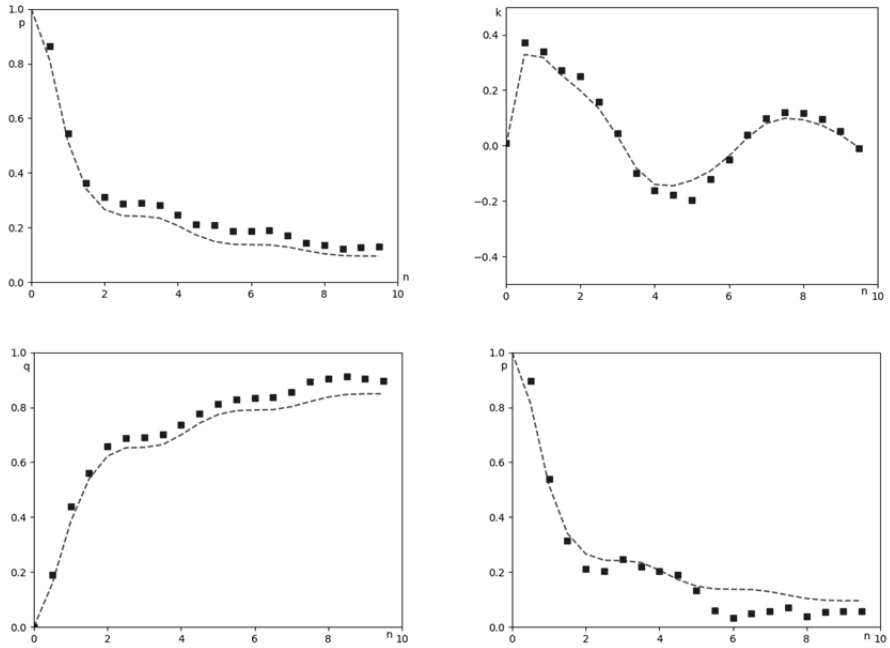


Рис. 4. Графики функций для значений P_{N+1} (левый верхний), K_{N+1} (правый верхний), θ_{N+1} (левый нижний), P_{N+1} (правый нижний). Пунктирной линией отмечены данные, полученные по формулам из постановки задачи, квадратами – при помощи нейронной сети

Fig. 4. Function graphs for the values P_{N+1} (upper left), K_{N+1} (upper right), θ_{N+1} (lower left) and P_{N+1} (lower right). Dotted lines show data obtained by the formulas from the problem statement and squares show data obtained with the help of a neural network

Из приведенных результатов (рис. 4) видно, что полученные при помощи нейронной сети значения коэффициентов θ_{N+1}, K_{N+1}, P_{N+1} в достаточной степени близки к данным, посчитанным по формулам. Левый верхний и правый нижний графики отличаются тем, что первый получен от нейронной сети, в которой параметры рассчитаны, а второй – путем обучения.

Также выполнялись эксперименты по расчету P_{N+1} при помощи нейронной сети, но с параметрами обучения, полученными путем обучения, а не расчета. Результаты приведены на нижнем правом графике на рис. 4. Нейронная сеть для расчета P_{N+1} была обучена при помощи адаптивного метода субградиента для онлайн-обучения и стохастической оптимизации (*AdamGrad*) [8] за 100 эпох с шагом обучения 0.1 без уменьшения шага обучения (*weight decay*).

На рис. 5 приведены результаты моделирования синтезированной нейронной сети при зашумленном входном сигнале. В качестве источника шума, как и в [15], взят генератор шума с нормальным законом распределения с отклонением $\sigma = 0.1$.

По приведенным графикам (рис. 5) видно, что, несмотря на то что график параметра P_{N+1} меняется под воздействием шума, на остальные параметры шум оказывает меньшее воздействие.

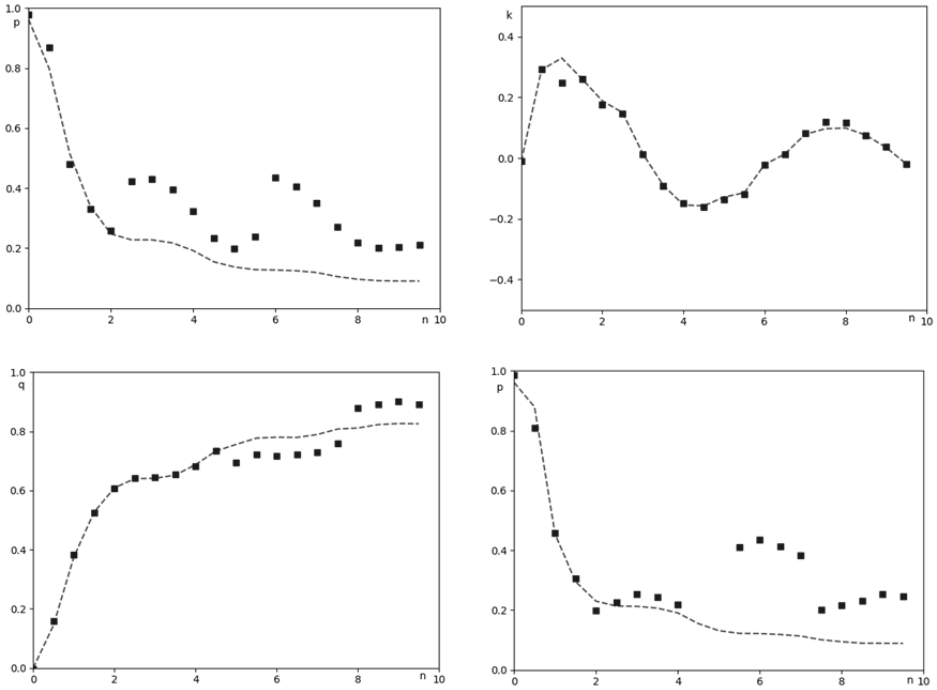


Рис. 5. Графики функций для значений P_{N+1} (левый верхний), K_{N+1} (правый верхний), θ_{N+1} (левый нижний), P_{N+1} (правый нижний) при зашумленном входном сигнале. Пунктирной линией отмечены данные, полученные по формулам из постановки задачи, квадратами – при помощи нейронной сети

Fig. 5. Function graphs for the values P_{N+1} (upper left), K_{N+1} (upper right), θ_{N+1} (lower left) and P_{N+1} (lower right) with noisy input signal. Dotted lines show data obtained by the formulas from the problem statement and squares show data obtained with the help of a neural network

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приводится реализация структуры нейронной сети для вычисления параметров статических объектов рекуррентным методом наименьших квадратов [15] для скалярного случая: q_{N+1}, K_{N+1}, P_{N+1}. Полученная нейронная сеть построена путем использования структуры для аппроксимации функции двух переменных. Причем соотношения для вычисления K_{N+1}, P_{N+1} являются функциями двух переменных и могут быть аппроксимированы без дополнительных модификаций; соотношение для расчета θ_{N+1} было представлено в виде выражения над функциями двух переменных и далее аппроксимировано таким же способом, что и предыдущие соотношения. Моделирование показало, что предлагаемая структура нейронной сети позволяет решить поставленную задачу. Исследуемый процесс зависит от начальных условий. В частности, начальное значение для параметра P нельзя выбирать близким к нулю (должно быть положительное).

Преимуществом предлагаемого подхода к построению структуры нейронной сети заключается в том, что множество недостатков, среди которых есть такие, как неопределенность при выборе количества слоев, типов

нейронов, нелинейностей и другие, теряют свою актуальность, так как сама структура нейронной сети получается из алгоритмического решения поставленной задачи. Полученная структура нейронной сети состоит из восьми слоев, 240 нейронов и 727 параметров обучения. При этом присутствуют обратные связи не только к входному слою, но и к скрытым.

Одним из направлений дальнейшего развития является минимизация количества параметров обучения.

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. – Vol. 1. – P. 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. – 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 Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2013. – Vancouver, Canada, 2013.

4. Playing Atari with deep reinforcement learning / V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra, M. Riedmiller // NIPS 2013 Workshops. – Lake Tahoe, 2013.

5. 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 // ArXiv.org. – 2017. – arXiv:1704.03732.

6. Prioritized experience replay / T. Schaul, J. Quan, I. Antonoglou, D. Silver // Proceeding ICLR 2016. – P. 1260–1268.

7. *Bishop C.* Pattern recognition and machine learning. – New York: Springer, 2007. – 738 p. – (Information science and statistics).

8. *Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.* Deep learning. – Cambridge: MIT Press, 2016. – 800 p.

9. *LeCun Y., Bengio Y., Hinton G.* Deep learning // Nature. – 2015. – Vol. 521, N 7553. – P. 436–444.

10. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting / N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, R. Salakhutdinov // Journal of Machine Learning Research. – 2014. – Vol. 15. – P. 1929–1958.

11. Early stopping without a validation set / M. Mahsereci, L. Balles, C. Lassner, P. Hennig // ArXiv.org. – 2017. – arXiv:1703.09580.

12. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Синтез нейронной сети для решения логико-арифметических задач // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 54. – С. 205–223.

13. *Романников Д.О.* О синтезе нейронных сетей // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 1 (91). – С. 104–111.

14. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Синтез нейронных сетей с несколькими переменными // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 1 (91). – С. 86–94.

15. *Воевода А.А., Трошина Г.В.* Оценивание параметров линейных статистических объектов с использованием рекуррентного метода наименьших квадратов в среде Simulink // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 3 (85). – С. 33–48.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики 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 автоматики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: машинное обучение, нейронные сети, сети Петри. Число научных публикаций – 51. E-mail: dmitry.romannikov@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42

Synthesis of a neural network for the implementation of the recursive least-squares method[*]

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 deals with the synthesis of a neural network for solving the problem of calculating the P, K, θ parameters of static objects by the recursive least-squares method for the scalar case. In doing so, the structure of the neural network is derived from realizable relationships in which each function of two variables is approximated by a separate neural network. To calculate the parameters K and P, it is sufficient only to approximate the original relations as they depend on only two variables (that is, they are functions of two variables). To calculate the θ parameter, it was necessary to represent the initial relation in the form of an expression over the functions of two variables, and then separately build neural networks to approximate them and synthesize the final neural network. The structure of a synthesized neural network is based on the use of a structure to approximate a function of two variables that allows one to calculate the parameters of a neural network and summators implemented on neurons. In this case, some of the links are recurrent. Experiments were performed to confirm the operation of the synthesized neural network for calculating the specified relationships 1) with the calculated neural network parameters; 2) with the neural network parameters obtained by training the method of gradient descent of the backward propagation error for the synthesized structure of the neural network. The graphs show that the parameters calculated with the help of a synthesized neural network correspond quite sufficiently to the values of the parameters obtained in the calculation of the initial formulas in the given range of water variables variation. The resulting neural network has the same convergence as the realizable relations.

Keywords: neural networks, synthesis, classification, structure of neural networks, learning techniques, 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, vol. 1, 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.

[*] *Received 10 May 2018.*

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 Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2013*, Vancouver, Canada, 2013.

4. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Graves A., Antonoglou I., Wierstra D., Riedmiller M. Playing Atari with deep reinforcement learning. *NIPS 2013 Workshops*, Lake Tahoe, 2013.

5. 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. *ArXiv.org*, 2017, arXiv:1704.03732.

6. Schaul T., Quan J., Antonoglou I., Silver D. Prioritized experience replay. *Proceeding ICLR 2016*, pp. 1260–1268.

7. Bishop C. *Pattern recognition and machine learning. Information science and statistics.* New York, Springer, 2007. 738 p.

8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep learning*. Cambridge, MIT Press, 2016. 800 p.

9. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444.

10. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 2014, vol. 15, pp. 1929–1958.

11. Mahsereci M., Balles L., Lassner C., Hennig P. Early stopping without a validation set. *ArXiv.org*, 2017, arXiv:1703.09580.

12. 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.

13. Romannikov D.O. O sinteze neironnykh setei [About of synthesis of neural networks]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (91), pp. 104–111.

14. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Cintez neironnykh setei c neskol'kimi peremennymi [Synthesis of neural networks with several variables]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (91), pp. 86–94.

15. Voevoda A.A., Troshina G.V. Otsenivanie parametrov lineinykh statisticheskikh ob"ektov s ispol'zovaniem rekurrentnogo metoda naimen'shikh kvadratov v srede Simulink [Estimation of the parameters of linear statistical objects using the recursive least-squares method in the Simulink environment]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (85), pp. 33–48.

Для цитирования:

Воевода А.А., Романников Д.О. Синтез нейронной сети для реализации рекуррентного метода наименьших квадратов // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 33–42. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42.

For citation:

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. 3 (72), pp. 33–42. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 43–58

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 43–58

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.7.056.53 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-43-58

Метод онтологического анализа web-ресурса на основе метаданных*

В.И. ВОРОБЬЕВ[1, a], А.А. СОЛДАТКИНА[2, b]

[1] *199178, РФ, Россия, г. Санкт-Петербург, 14-я линия, 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук*
[2] *197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, 5, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. Ленина*

[a] *vvi@iias.spb.su* [b] *alinasoldatkina2014@gmail.com*

Важной проблемой современного интернет-сообщества является распространение огромного количества информации, что вызывает трудности для быстрого поиска достоверных знаний. В данной работе предложен новый метод технологии анализа и обработки данных, который, основываясь на семантических связях, ускоряет вывод необходимой информации, а также оценивает надежность ее источников. Особое внимание в статье уделено рассмотрению применяемых на сегодняшний день методов анализа web-контента. В статье предлагается использовать новый метод, который основывается на выделении метаинформации с web-сайта и рассмотрении ее семантических связей. Для этого в редакторе Protege 5.0 разработана семантическая модель, содержащая большое количество классов и свойств, характерных для элементов данной предметной области. В работе рассмотрены все основные этапы построения онтологической модели предметной области, выделены методы анализа и классификации web-ресурсов, приведены примеры описания классов и содержащихся в них экземпляров, отношений между ними. Для автоматической классификации разработаны логические правила, которые проверяют семантические связи между метаданными ресурса и наборами ключевых слов классов. Надежность источника определяется исходя из набора и объема его метаданных, что позволяет оценить достоверность и качество представленного контента. Предложенный онтологический подход является перспективным с точки зрения высокого уровня интероперабельности информационных систем за счет открытых интерфейсов доступа, а также путем использования единого формата записи и обмена данными. В рамках онтологического подхода семантическая способность к взаимодействию реализована на основе единого представления информации в предметной области. Для повышения скорости и точности вывода поисковых запросов предлагается использовать запросы из семантической базы данных на языке SPARSQL, примеры которых также приводятся в статье.

Ключевые слова: семантические технологии, онтология, rdf, owl, метаданные, уровень доверия, SPARSQL, анализ web-ресурсов, квалиметрическая шкала

* *Статья получена 27 мая 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху формирования цифровой инфраструктуры информационного общества информация становится ключевым объектом, необходимым для успешного развития государства и общественной жизни. Объемы информации, циркулирующие в web-пространстве, динамично развиваются, и ее объем удваивается ежегодно. При этом возрастает доля ложной, недостоверной и заведомо искаженной (фейковой) информации [1, 2]. Важно то, что объемы подобной информации достигли критических значений – это открывает возможность манипулирования информацией и ее восприятием.

Фактически 49 % пользователей социальных сетей в США в 2012 году получили ложные новости через социальные сети. Аналогичным образом согласно опросу Silverman 11, проведенному в 2015 году, ложные слухи и дезинформация распространяются быстрее, чем когда-либо, из-за социальных сетей. Политические аналитики продолжают обсуждать дезинформацию и поддельные новости в социальных сетях и их влияние на президентские выборы в США в 2016 году [3]. Международная перепись населения с 2017 года насчитывала 114 активных служб проверки фактов, что на 19 % больше по сравнению с предыдущим годом.

Важной задачей современного информационного общества является развитие и разработка методов, которые бы позволили быстро анализировать ресурсы, оценивать надежность и качество представленных в них данных.

Актуальность задачи подтверждается наличием ряда проектов разных стран. В частности, в рамках европейской программы HORIZON 2020 разрабатывается проект AEGIS, направленный на создание взаимосвязанной цепочки ценностей данных, в котором создается новая платформа для большого объема данных, интеграции, анализа и обмена данными на разных языках, очистки данных, связывания семантических данных, построения системы ценности данных пользователей и организаций и внедрения новых бизнес-моделей для экономики обмена данными. Проект AEGIS стремится повысить ценность данных, хранящихся на его платформе, путем семантического обогащения их более полезной информацией, и это будет сделано с использованием хорошо установленных стандартов и технологий.

Качественный анализ содержимого web-ресурсов занимает большое количество времени и требует существенных затрат людских и материальных ресурсов. Для автоматической обработки web-документа можно внедрить подход, основанный на семантическом анализе метаданных [4], которые занимают малый процент от общего количества контента, но тем не менее содержат описания основных и дополнительных свойств web-ресурса (его происхождение, назначение, связи, имиджевый ресурс, промосайт, лендинг (landing page), корпоративный веб-сайт, информационный портал, интернет-магазин, «business-to-business»-представительство, «виртуальный офис»).

Метаданные рассредоточены по всему web-документу, поэтому важной задачей является описать их, не потеряв никаких семантических связей [5]. Для решения данной задачи применяются семантические технологии. Мета-информация, представленная в виде семантической сети, ускорит поиск необходимой информации, сделает ее более безопасной и надежной, повысит релевантность выводимых данных.

1. МЕТОДЫ АНАЛИЗА WEB-РЕСУРСОВ

Важнейшим элементов любой web-страницы является ее контент, т. е. наполнение. В контент входят текст, графика, видео-, аудио- и другая информация. Качественное наполнение сайта очень сильно влияет на его рейтинги и отзывы пользователей [6]. Для оценки контента используют множество средств и методов: анализ юзабилити сайта, анализ семантического ядра запросов, анализ сайта к индексации и видимости машинами, анализ посещаемости сайта и сбор статистики.

Специалисты области анализа сайтов выделяют два основных метода – количественный и качественный.

Количественный анализ позволяет оценить сайт в «цифрах». Он показывает, сколько структурных единиц было задействовано в создании сайта. Оценивается количество слов, плотность и размер текста, наличие ключевых слов и многое другое.

Качественным методом можно оценить контент сайта с точки зрения пользователя. Обращается внимание на уровень изложения материала, его точность и уникальность, оцениваются легкость подачи информации и актуальность. Важным показателем является соответствие содержания текста заголовку [7]. Оценка качественных показателей вызывает большие трудности.

Существует несколько методов проверок соответствия страниц поисковым запросам пользователей – «от поисковиков» и «от сайта». Первый метод не анализирует сайт, который еще не был проиндексирован поисковой системой, да и сама поисковая система не может интерпретировать так же качественно, как человек. Конечно, сейчас активно ведутся работы в области искусственного интеллекта и нейронных сетей, но на практике внедрить их непросто. В базах данных информация содержится в структурированном виде, но при передаче ее на интернет-страницу многие связи теряются и значительная часть важной информации растворяется в общем потоке текста. Для неструктурированной информации поисковики придают больший вес ключевым словам сайта даже при частичном использовании семантического анализа.

Второй метод проверки (качественный) оценивает уровень слов и словосочетаний, отражающих структуру и тематику сайтов. Он идеален для только созданных web-страниц и берет во внимание интересы пользователей. Но такой метод очень трудоемок, и автоматизировать его очень сложно.

На сегодняшний день существует много онлайн-сервисов по проверке репутации сайта. Задачу определения уровня доверия решает сам пользователь, и, учитывая его недостаточную осведомленность, доверие формируется случайным набором факторов (интуицией, навязанным мнением). Особенно ярко это проявляется в социальных сетях, блогах, новостных сводках. Поэтому проблема доверия к предоставляемой информации остро стоит перед всеми пользователями. По данным Всероссийского центра общественного мнения за 2017 год, лишь 19 % опрошенных доверяют новостным, аналитическим и официальным сайтам, 22 % не доверяют, остальные затрудняются в однозначном ответе.

С доверием связаны вопросы и идентификации, и безопасной передачи информации, и контроля доступа, поэтому люди склонны подвергать сомнению информацию из непроверенных источников, которыми являются в большинстве своем web-ресурсы. Так как штатные средства не обеспечивают

должного уровня безопасности, то пользователь прибегает к своему личному опыту оценки доверия.

Грамотное использование метаданных позволяет повысить уровень доверия, так как содержит структурную информацию о контенте.

2. ПРИМЕНЕНИЕ СЕМАНТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ И АНАЛИЗА МЕТАДАННЫХ

Для описания большого количества неструктурированных данных применяются технологии Semantic Web, содержащие инструменты для представления данных и связей между ними (рис. 1) [8].

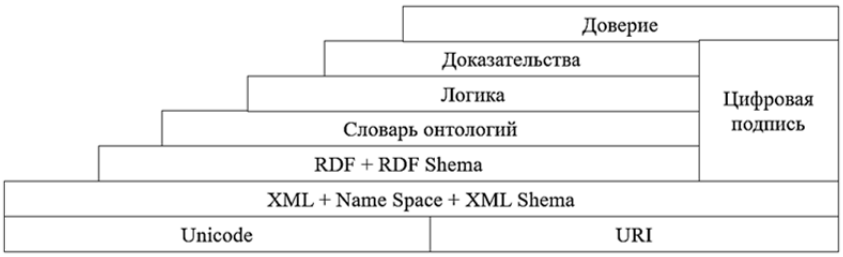


Рис. 1. Архитектура Semantic Web

Fig.1. The architecture of Semantic Web

Представленная архитектура обозначает инструментальный фундамент, на котором строится доверие к web-ресурсу. В возможности семантического веба входят семантический поиск, объединение данных, логический вывод [9].

На языках XML и RDF данные записываются в виде триплетов, но их возможностей недостаточно, чтобы описать всю структуру и все связи web-данных. Язык OWL позволяет создавать онтологии в терминах классов и свойств, поддерживает описание простых логических проверок целостности онтологий предметной области и их связей друг с другом, а также импорт внешних определений.

Онтологии явно описывают метаданные web-ресурсов и их отношения. По своей структуре онтология представляет собой набор некоторых категорий: классы, отношения, функции, аксиомы, экземпляры. Онтологический анализ строится на разделении данных на классы с последующим выделением подклассов и экземпляров данных классов.

Важным элементом онтологий являются отношения, функции и аксиомы. Одним из самых распространенным видов связей являются отношения категоризации, имеющие несколько названий: отношение is-a, класс – подкласс, родовое отношение, отношение a-kind-of [10]. Функции – это вид отношений, с помощью которых можно выразить, как экземпляры связаны между собой, в каких ролях они находятся. Аксиомы нужны для выражения утверждений, которые связывают понятия и свойства. Они позволяют продемонстрировать информацию, которую очень трудно описать другими методами, такими как построение иерархий понятий или установки отношений и функций.

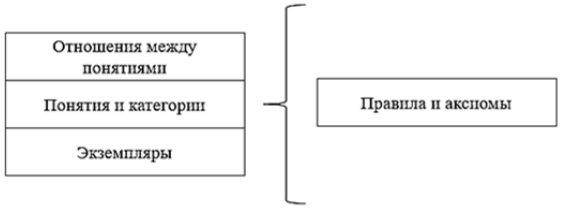


Рис. 2. Структура онтологий

Fig. 2. The structure of ontologies

Экземпляры в онтологии выступают в роли индивидуумов, под которыми подразумеваются конкретные элементы класса. Все элементы подчиняются иерархии, представленной на рис. 2.

3. ВЫДЕЛЕНИЕ МЕТАДАННЫХ ИЗ WEB-РЕСУРСА

Контент ресурса (текст, аудио, изображение и др.) имеет метаданные, которые не всегда видны пользователю, но которые необходимы для поиска и структуризации информации [11, 12]. Так, например, метаданные позволяют построить фолксономию сайта, т. е. «категорировать» данные за счет произвольно выбираемых тегов.

Все метаданные, содержащиеся в web-ресурсе, можно разделить на четыре категории (рис. 2).

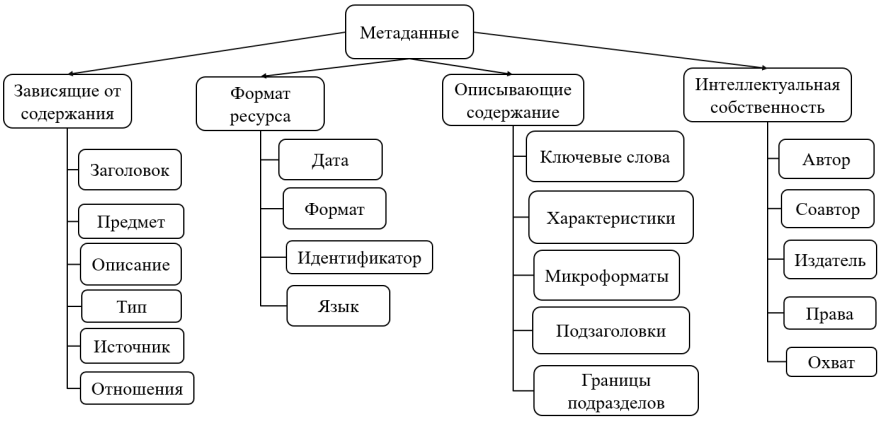


Рис. 3. Метаданные web-ресурсов

Fig. 3. Web-resource metadata

Стандартом описания метаданных web-документов является так называемое дублинское ядро, содержащее пятнадцать элементов. Особенностью такого описания является то, что элементы могут повторяться или не содержаться вовсе.

Пример описания web-страницы с использованием элементов дублинского ядра:

```
<META NAM E="DC. Title" CONTENT="Каталог образовательных
ресурсов сети Интернет">
```

<META NAME="DC. Subject" CONTENT="Образовательные ресурсы сети Интернет">

<META NAME="DC. Keywords" CONTENT="федеральные образовательные ресурсы, ресурсы по предметам образовательной программы ">

<META NAME="DC. Description" CONTENT="Каталог образовательных ресурсов сети Интернет для основного общего и среднего (полного) общего образования. ">

<META NAME="DC.Creator " CONTENT=" EDU-TOP">

<META NAME="DC. Publisher. CorporateName" CONTENT="Первый независимый общероссийский рейтинг-каталог школьных сайтов EDU-TOP.ru">

<META NAME="DC. Contributor. PersonalName" CONTENT="Иванов. А. Н ">

<META NAME="DC. Date. Query" CONTENT="2018-04-09">

<META NAME="DC. Format" CONTENT="text/html">

<META NAME="DC. Format" CONTENT="23 976 bytes">

<META NAME="DC. Type" CONTENT="Text">

<META NAME="DC. Type" CONTENT="Изображение X-ICON">

<METANAME="DC.Source"CONTENT="https://yandex.ru/clck/jsredir?bu=uniq15227517223851266254 3&from=yandex.ru%3Bsearch%2F%3Bweb%3B%3B&text=&etext=1746.C0">

<META NAME="DC. Identifier" CONTENT="http://edu-top.ru/katalog/">

<META NAME="DC. Language" CONTENT="ru">

<META NAME="DC. Relation" http://edu-top.ru/katalog/favicon.ico">

<META NAME="DC. Coverage. PlaceName" Российская Федерация">

Микроформаты тоже являются метаданными ресурса, так как это один из способов семантической разметки сведений о разных объектах (событиях, организациях, людях, товарах и т. д.) на web-ресурсах с помощью стандартных элементов языка html и xhtml [8]. Интеллектуальные агенты способны извлечь из таких форматов структурированную информацию, следуя определенным правилам и соглашениям. Поскольку микроформаты основаны на уже существующих стандартах, их легко добавлять на существующие страницы web-ресурсов.

4. ПОСТРОЕНИЕ СЕМАНТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для семантического описания метаданных и написания онтологий удобно использовать редактор Protege.

Этапы построения онтологий: создание классов и определение подклассов, создание свойств, занесение экземпляров, определение форматов, определение связей между экземплярами и классами, создание аксиом, формирование запросов [13].

На первом этапе нужно определить основные классы, а также выделить подклассы. На основе таксономических отношений строится дерево классификации понятий, иначе говоря, иерархия классов. Корень дерева – web-ресурс, его подклассы – классификация web-ресурсов и метаданные (рис. 4).

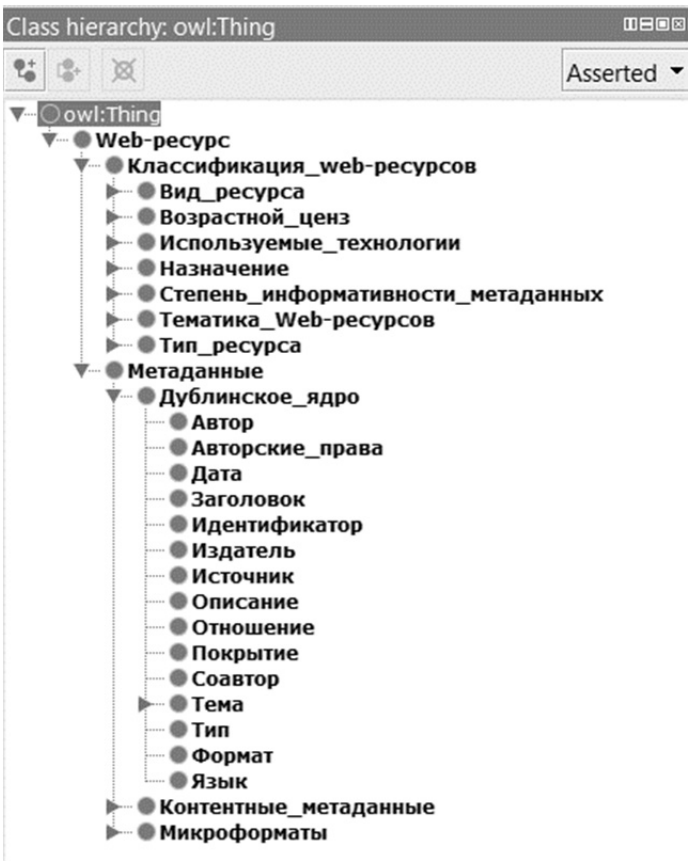


Рис. 4. Классы онтологической модели

Fig. 4. Ontological model classes

Редактор Protege позволяет наглядно увидеть классы и связи между ними с помощью механизмов построения семантической сети. Семантическая сеть представляет собой сетевую модель предметной области (ПрО), которая имеет вид ориентированного графа, узлами которого являются классы, а ребра – связями (рис. 5).

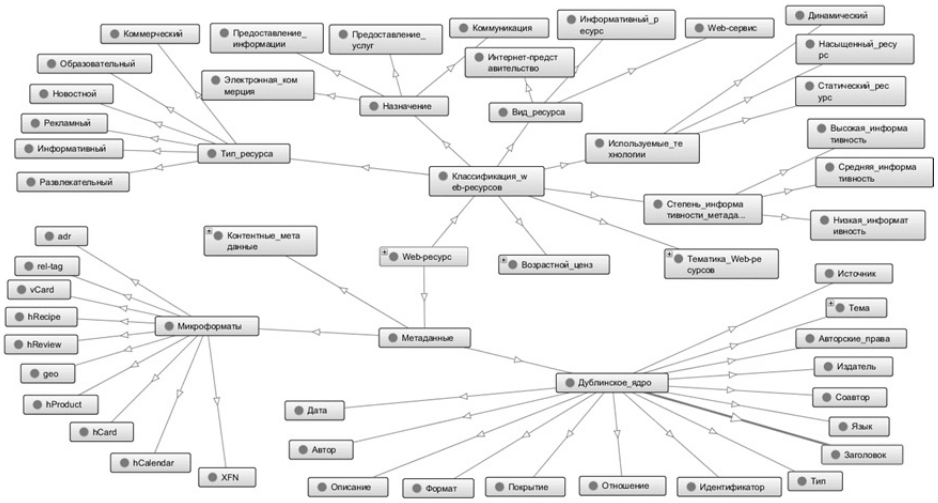


Рис. 5. Пример иерархии классов web-ресурсов

Fig. 5. An example of hierarchy of Web-resource classes

В онтологических моделях классы представляют собой общие понятия о ПрО. Каждый класс описывает индивидуальность сущностей, которые имеют общие атрибуты или свойства, например, web-ресурс и его автор. На вкладке Object Property создаются онтологии (рис. 6).

Рис. 6. Панель описания множества свойств, присущих объектам ПрО

Fig. 6. A panel of description of a set of properties characteristic of objects

На языке rdf это выглядит следующим образом:

```
<SubObjectPropertyOf>
    <ObjectProperty IRI="#имеет_автора"/>
    <ObjectProperty IRI="#Дублинское_ядро"/>
</SubObjectPropertyOf>
```

При создании свойства определяются его диапазон и домен из существующих классов, а также дополнительные характеристики. Например, свойству «имеет_автора» соответствует онтология – противоположное свойство «автор_ресурса».

С помощью OntoGraf можно наглядно увидеть связь свойств и классов. На рис. 7 представлены связи между web-ресурсом и классами классификаций, а на рис. 8 – между web-ресурсом и элементами дублинского ядра.

Рис. 7. Фрагмент визуализации онтологии классификации web-ресурса

Fig. 7. A visualization fragment of the Web-resource classification ontology

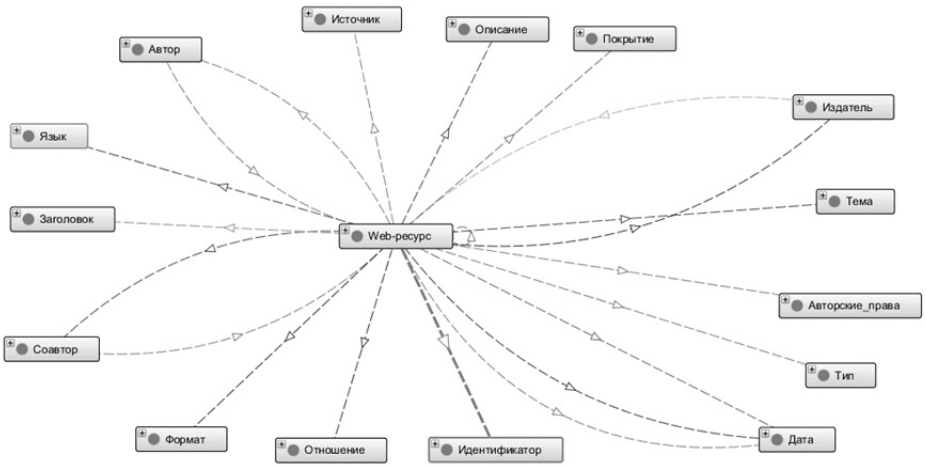


Рис. 8. Фрагмент визуализации онтологии описания web-ресурса

Fig. 8. A visualization fragment of the Web-resource description ontology

Индивиды в редакторе Protege определяются с помощью аксиом фактов: факты членства в классах, факты о значении свойств индивидов.

Пример аксиом первого вида:

```
<ObjectPropertyAssertion>
    <ObjectProperty IRI="#имеет_язык"/>
    <NamedIndividual IRI="#102058_Web-ресурс"/>
    <NamedIndividual IRI="#ru"/>
</ObjectPropertyAssertion>
```

Аксиомы устанавливают, к каким классам принадлежит объект и какими свойствами он обладает, а также определяют связи между объектами (рис. 9).

Рис. 9. Окно описания экземпляров

Fig. 9. A window of copy description

Значения экземпляров задаются с помощью новых свойств, таких как owl:DatatypeProperty. Для этого используются аксиомы второго вида:

```
<DataPropertyAssertion>
    <DataProperty IRI="#телефон"/>
    <NamedIndividual IRI="#Смирнов_Сергей_Борисович"
/>                                          <Literal
datatypeIRI="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">+
7(495)984 81 36
</Literal>
    </DataPropertyAssertion>
```

Для создания и определения значений нужно перейти на вкладку Data Properties (рис. 10).

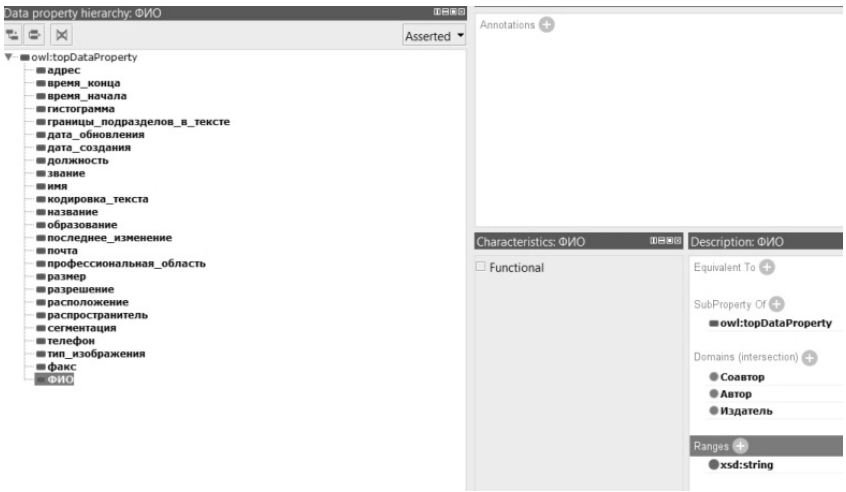


Рис. 10. Окно значений экземпляров

Fig. 10. A window of copy values

Возможности логического вывода редактора Protege «по умолчанию» довольно скромны, поэтому для вывода неявных следствий онтологии применяют SWRL-правила. Каждый класс имеет некоторые ключевые слова, присущие именно ему и, если ресурс содержит эти ключевые слова, то мы относим его к классу. Такие логические правила позволяют создавать новые триплеты.

Пример SWRL-правила:

`содержит_ключевое_слово(?x, ?y) ^ Тематика_Web-ресурсов(?y) ->Тематика_Web-ресурсов(?x)`

Данное правило проверяет, содержит ли ресурс ключевые слова, которые принадлежат определенной теме, и если содержит, то ресурс также можно отнести к этой теме.

Редактор Protege позволяет в интерактивном режиме вводить sql запросы. Для этого нужно перейти на вкладку SPARQL Query. Язык SPARQL очень похож на стандартный язык запросов к БД SQL, но имеет и несколько существенных отличий. SPARQL – язык запросов к RDF хранилищам, т. е. к данным, представленным в виде RDF-триплетов. До начала работы следует прописать PREFIX, который будет служить для указания сокращений универсальных идентификаторов ресурса (URI).

Редактор Protege позволяет работать с четырьмя типами запросов к данным: запрос «по умолчанию», запрос с применением информации о литерале, запрос на основе данных об индивидууме, запрос на основе данных об объектных свойствах классов.

Примеры

Показать все элементы дублинского ядра для одного web-ресурса

Запрос:

```
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
```

```
PREFIX
:<http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2018/4/ont
ology-web#>
SELECT distinct ?метаданные ?значения
WHERE { :103679_Math-Net.Ru ?метаданные ?значения .
        ?метаданные rdf:type owl:ObjectProperty }
```

метаданные	значения
имеет_язык	ru
имеет_покрытие	Москва,Россия
имеет_соавтора	Смирнов_Сергей_Борисович
имеет_формат	text/html;_charset=UTF-8
авторские_права_принадлежат	Отдел_компьютерных_сетей_и_информационных_технологий
имеет_издателя	Математический_институт_им._В.А._Стеклова_Российской_академии_наук
имеет_ключевое_слово	Математический_институт_им._В._А._Стеклова_РАН
имеет_описание	Общероссийский_математический_портал_Math-Net.Ru_—_это_современная_информационная_систе
имеет_дату_создания	2003-09
имеет_заголовок	Общероссийский_математический_портал
имеет_тип	Text
имеет_тему	Общероссийский_математический_портал
имеет_заголовок	Math-Net.Ru
имеет_идентификатор	URL:http://www.mathnet.ru/
имеет_автора	Чебуков_Дмитрий_Евгеньевич

Рис. 11. Ответ на запрос по выводу дублинского ядра

Fig. 11. Answer to the inquiry about the Dublin core output

Показать проклассифицированный web-ресурс

Запрос:

```
SELECT distinct ?класс ?значение
WHERE {:102058_Web-ресурс rdf:type ?значение .
?значение rdfs:subClassOf ?класс}
```

класс	значение
Назначение	Предоставление_информации
Тип_ресурса	Развлекательный
Используемые_технологии	Насыщенный_ресурс
Степень_информативности_метаданных	Средняя_информативность
Возрастной_ценз	0+

Рис. 12. Вывод классификаций одного ресурса

Fig. 12. Output of one resource classifications

Вывести всю информацию об авторе определенного web-ресурса

Запрос:

```
SELECT distinct ?автор ?информация ?значение
WHERE {:103679_Math-Net.Ru :имеет_автора ?автор .
    ?автор ?информация ?значение.
    ?информация rdf:type owl:DatatypeProperty }
```

автор	информация	значение
Чебуков_Дмитрий_Евгеньевич	должность	"зав. информационно-издательским сектором"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string>
Чебуков_Дмитрий_Евгеньевич	звание	"кандидат хим. наук"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string>
Чебуков_Дмитрий_Евгеньевич	телефон	"+7 (495) 984 81 41"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string>
Чебуков_Дмитрий_Евгеньевич	почта	"tche@mi.ras.ru"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string>

Рис. 13. Вывод информации об авторе

Fig. 13. Output of information about the author

Вывести возрастной ценз ресурсов
Запрос:

```
SELECT ?ресурс ?class
WHERE {?ресурс rdf:type :Web-ресурс.
    ?ресурс rdf:type ?class.
    ?class rdfs:subClassOf :Возрастной_ценз}
```

ресурс	class
102058_Web-ресурс	0+
103679_Math-Net.Ru	6+

Рис. 14. Вывод возрастного ценза ресурса

Fig. 14. Output of the resource voting age

Вывести ресурс, издатель которого имеет определенный номер телефона
Запрос:

```
SELECT ?ресурс ?издатель ?информация
WHERE {?ресурс rdf:type :Web-ресурс.
    ?ресурс :имеет_издателя ?издатель.
    ?издатель :телефон ?информация.
FILTER(str (?информация) = "89872345634")}
```

ресурс	издатель	информация
103679_Math-Net.Ru	Математический_институт_им._В.А._Стеклова_Российской_академии_наук	"89872345634"^^<http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer>

Рис. 15. Вывод определенного ресурса

Fig. 15. Output of a certain resource

Задачу количественной оценки доверия (рисков использования web-ресурса) можно построить с помощью введения квалиметрических шкал. Как показано выше, мы можем построить наборы тестовых вопросов для определения уровня доверия каждого используемого информационного элемента. Далее достоверность можно оценивать с помощью квалиметрической шкалы. В качестве примера рассмотрим случай: когда данные из всех источников совпадают, отсчет на шкале будет иметь значение «1», а если все источники дают разные данные, то значение «0». Промежуточные значения в зависимости от совпадения могут принимать значения от нуля до единицы [14, 15].

В результате мы имеем возможность строить вектор показателей уровня доверия сложного ПрО в виде $q = (q1,\ldots, qn)$, $qi\ (x)i = 1,\ldots,l$ вектора исходных характеристик $x = (x1,\ldots, xn)$, где xi – i-минимальный информационный элемент web-ресурса. Например, для оценки достоверности данных сайта применяются набор показателей q в зависимости от x (характеристики: происхождение, назначение, связи и т. д.). После получения набора отдельных показателей выбирается синтезирующая функция:

$$Q\ (q) = Q\ (q; w),$$

где $w = (w1,\ldots, wl)$, $w1,+ \ldots + wl = 1$ рассматриваются как весовые коэффициенты, задающие степень влияния отдельных показателей на сводную оценку.

В случае дефицита информации при неопределенности выбора функций q, Q и вектора w квалиметрическая шкала имеет более бедную структу-

ру, чем обычная числовая шкала (например, показатели качества сайта в зависимости от его места его размещения). В этом случае задача оцифровки состоит в выборе отображения φ (b), где b – качественная характеристика (например, баллы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная прикладная онтология позволяет решать задачи логического и структурированного описания информации, а также категоризации, быстрого поиска и анализа данных. С помощью языка OWL спроектирована информационная система, оперирующая знаниями, содержащимися в онтологиях. Показана возможность построения базы знаний ПрО. Приведены примеры запросов, которые позволяют нам определить уровень доверия. Приводится алгоритм для его количественного определения. В будущем онтология может использоваться в качестве баз знаний для формирования единой среды интеллектуальной системы для классификации web-данных. Разработана классификация web-данных. Использование интеллектуальных агентов позволит в будущем формулировать запрос и оценивать ответ на него с помощью семантических связей и ограничений, описанных в онтологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осипов В.Ю., Воробьев В.И., Левоневский Д.К.* Проблемы защиты от ложной информации в компьютерных сетях // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 4 (53). – С. 97–117.

2. *Бергель Х.* Брюс Шнаер о цифровых угрозах будущего // Открытые системы. СУБД. – 2018. – № 1. – С. 34.

3. *Brandtzaeg P., Følstad A.* Trust and distrust in online fact-checking services // Communications of the ACM. – 2017. – Vol. 60, N 9. – P. 65–71.

4. *Тузовский А.Ф.* Архитектура семантического web-портала // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 7. – С. 142–145.

5. *Gruber T.* Collective knowledge systems: where the Social Web meets the Semantic Web // Journal of Web Semantics. – 2008. – Vol. 6, N 1. – P. 4–13.

6. *Ландэ Д.В.* Поиск знаний в Internet. – М.: Диалектика, 2005. – 272 с. – (Профессиональная работа). – ISBN 5-8459-0764-0.

7. *Рогушина Ю.В., Гришанова А.Ю.* Средства интеллектуализации поиска информационных ресурсов в сети Интернет // Сборник трудов VII Международной конференции «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2007». – Киев, 2007. – С. 322–331.

8. *Yi L., Liu B.* Web page cleaning for web mining through feature weighting // Proceedings of Eighteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-03). – Acapulco, Mexico, 2003. – P. 43–48.

9. *Gladun A., Rogushina J., Shtonda V.* Ontological approach to domain knowledge representation for information retrieval in multiagent systems // Information Theories and Applications. – 2006. – Vol. 13, N 4. – P. 354–362.

10. *Gruber T.* Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? // International Journal Human-Computer Studies. – 1995. – Vol. 43. – P. 907–928.

11. *Гото К.* Веб-редизайн: книга Келли Гото и Эмили Котлер. – СПб.: Символ-Плюс, 2003. – 376 с.

12. Семантика, метаданные и онтологии в приложениях для умного города – новые стандарты BSI / В.П. Куприяновский, Д.И. Ярцев, А.А. Харитонов, Н.А. Уткин, Д.Е. Николаев, В.И. Дрожжинов, Д.Е. Намиот, Ю.И. Волокитин // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5, № 6. – С. 94–108.

13. *Горшков С.С.* Введение в онтологическое моделирование. – [Б. м.]: ООО ТриниДата, 2016. – 165 с.

14. *Хованов Н.В.* Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1996. – 196 с.

15. *Hovanov N., Yudaeva M., Hovanov K.* Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge // European Journal of Operational Research. – 2009. – Vol. 195, iss. 3. – P. 857–863.

Воробьев Владимир Иванович, профессор, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. В списке научных трудов более 115 работ в области математического моделирования и информатики. E-mail: vvi@iias.spb.su

Солдаткина Алина Андреевна, студент магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета. E-mail: alinasoldakna2014@ gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-43-58

Method of ontological analysis of a web-resource based on metadata[*]

V.I. VOROBYEV[1, a], *A.A. SOLDATKINA*[2, b]

[1] *St. Petersburg, St.-Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 14 Line, 39, St. Petersburg, 199178, Russia*
[2] *St.-Petersburg State Electrotechnical University named after Lenin, Professor Popov St., Building 5, St. Petersburg, 197376, Russia*

[a] *vvi@iias.spb.su* [b] *alinasoldatkina2014@gmail.com*

Abstract

An important problem of the modern Internet community is the dissemination of a huge amount of information, which makes it difficult to quickly find the right knowledge. In this paper we propose a new method of analysis and data processing technology that, based on semantic links, accelerates the output of necessary information, and also assesses the reliability of its sources. Particular attention in the article is given to the methods of analysis of web content that are used today. The article proposes using a new method which is based on the allocation of meta-information from the web-site and consideration of its semantic links. To do this, the Protégé 5.0 editor developed a semantic model that contains a large number of classes and properties characteristic of the elements of the given subject area. The paper considers all the basic stages of constructing an ontological model of the subject area, identifies methods for analyzing and classifying web resources, gives examples of the description of classes and the instances contained in them as well as the relationships between them. For automatic classification, logical rules are developed that check semantic links between the resource metadata and the sets of class keywords. The dependability of the source is determined based on its metadata set and volume, which allows you to evaluate the reliability and quality of the presented content. The proposed ontological approach is promising from the point of view of a high level of interoperability of information systems due to open access interfaces as well as by using a single recording format and exchange of data. Within the framework of the ontological approach, the semantic ability to interact is realized on the basis of a unified representation of information in the subject domain. To increase the speed and accuracy of the output of search queries, it issuggested using queries from the semantic database in the SPARSQL language, whose examples are also given in the article.

Keywords: semantic technologies, ontology, rdf, owl, metadata, confidence level, SPARSQL, web resources analysis, qualimetric scale

[*] *Received 27 May 2018.*

REFERENCES

1. Osipov V.Yu., Vorob'ev V.I., Levonevskii D.K. Problemy zashchity ot lozhnoi informatsii v komp'yuternykh setyakh [Problems of protection from false information in computer networks]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2017, iss. 4 (53), pp. 97–117.

2. Berghel H. Bryus Shnaer o tsifrovykh ugrozakh budushchego [Bruce Shnaer on future digital threats]. *Otkrytye sistemy. SUBD – Open Systems. DBMS*, 2018, no. 1, p. 34.

3. Brandtzaeg P., Følstad A. Trust and distrust in online fact-checking services. *Communications of the ACM*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 65–71.

4. Tuzovsky A.F. Arkhitektura semanticheskogo Webportala [The architecture of the semantic Web portal]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 7, pp. 142–145.

5. Gruber T. Collective knowledge systems: where the Social Web meets the Semantic Web. *Journal of Web Semantics*, 2008, vol. 6, no. 1, pp. 4–13.

6. Lande D.V. *Poisk znanii v Internet* [Search of knowledge on the Internet]. Moscow, Dialektika Publ., 2005. 272 p. ISBN 5-8459-0764-0.

7. Rogushina Yu.V., Grishanova A.Yu. [Means of intellectualization of the search for information resources in the Internet]. *Tezisy VII Mezhdunarodnoi konferentsii "Intellektual'nyi analiz informatsii IAI-2007"* [Proceedings of the VII International Conference "Intellectual Analysis of Information IAI-2007"]. Kiev, 2007, pp. 322–331. (In Russian).

8. Yi L., Liu B. Web page cleaning for web mining through feature weighting. *Proceedings of Eighteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-03)*, Acapulco, Mexico, 2003, pp. 43–48.

9. Gladun A., Rogushina J., Shtonda V. Ontological approach to domain knowledge representation for informational retrieval in multiagent systems. *Information Theories and Applications*, 2006, vol. 13, no. 4, pp. 354–362.

10. Gruber T. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal Human-Computer Studies*, 1995, vol. 43, pp. 907–928.

11. Goto K. *Web redesign*. Indiana, New riders, 2002 (Russ. ed.: Goto K. *Veb-redizain: kniga Kelli Goto i Emili Kotler*. St. Petersburg, Simvol-Plyus Publ., 2003. 376 p.).

12. Kupriyanovsky V.P., Yartsev D.I., Kharitonov A.A., Utkin N.A., Nikolaev D.E., Drozhzhinov V.I., Namiot D.E., Volokitin Y.I. Semantika, metadannye i ontologii v prilozheniyakh dlya umnogo goroda – novye standarty BSI [Semantics, metadata and ontologies in smart city applications - new BSI standards]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, vol. 5, no. 6, pp. 94–108.

13. Gorshkov S.S. *Vvedenie v ontologicheskoe modelirovanie* [Introduction to ontological modeling]. LLC TriniData Publ., 2016. 165 p.

14. Khovanov N.V. *Analiz i sintez pokazatelei pri informatsionnom defitsite* [Analysis and synthesis of indicators in the information deficit]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 1996. 196 p.

15. *Hovanov N., Yudaeva M., Hovanov K.* Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge. *European Journal of Operational Research*, 2009, vol. 195, iss. 3, pp. 857–863.

Для цитирования:

Воробьев В.И., Солдаткина А.А. Метод онтологического анализа web-ресурса на основе метаданных // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 43–58. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-43-58.

For citation:

Vorobyev V.I., Soldatkina A.A. Metod ontologicheskogo analiza web-resursa na osnove metadannykh [Method of ontological analysis of a web-resource based on metadata]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 43–58. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-43-58.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 59–72

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 59–72

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.5.01:681.51.013 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-59-72

Компенсация возмущений в задаче робастного управления сетью объектов с распределенным и дискретным запаздыванием*

А.В. ИМАНГАЗИЕВА

414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет

aliya111@yandex.ru

Предложено решение задачи управления сетью объектов, математическими моделями которых являются дифференциальные уравнения с распределенным и дискретным запаздываниями. Робастное управление, предложенное автором для объекта с распределенным запаздыванием, применяется для формирования управляющих воздействий в каждом из локальных объектов сети. Компенсация действия внешних и внутренних возмущений в каждой из локальных подсистем осуществляется с помощью вспомогательного контура и двух наблюдателей производных переменных системы управления. Применение наблюдателей переменных обусловлено необходимостью получения оценок производных переменных системы, измерение которых недоступно. Таким образом выбранная схема формирования управляющего воздействия позволяет выделить сигнал, который несет информацию о неизвестных параметрах математической модели, распределенном и дискретном запаздывании. Полученный алгоритм управления является децентрализованным, так как в каждом из локальных объектов управления осуществляется слежение за сигналом локальной эталонной модели. Достоинством предложенного алгоритма является тот факт, что для формирования управляющих воздействий в каждом из локальных объектов требуются измерения только скалярных входа и выхода подсистемы. Приведен числовой пример системы управления сети, состоящей из трех динамических объектов с распределенным и дискретным запаздыванием. Для сети объектов применен предложенный децентрализованный алгоритм управления. Проведено численное моделирование в пакете Simulink Matlab, приведены графики переходных процессов по ошибкам слежения и выходам объектов и эталонных моделей для каждой из трех подсистем. Результаты моделирования подтвердили теоретические выводы и показали хорошую работоспособность предложенного децентрализованного алгоритма управления в условиях постоянно действующих внешних и внутренних возмущений.

Ключевые слова: сеть, робастное управление, ограниченные возмущения, точность, распределенное запаздывание, дискретное запаздывание, алгоритм управления, наблюдатель Халила, метод вспомогательного контура

* *Статья получена 06 апреля 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день системы управления объектами с распределенным и дискретным запаздыванием заслуживают отдельного внимания, поскольку анализ публикационной активности показывает, что в нашей стране достаточно мало работ, посвященных управлению такими объектами, в то время как в ведущих иностранных изданиях по теории управления опубликовано большое количество статей и монографий по данной тематике, например, такие как [1–3]. Актуальность поставленной задачи объясняется ее решением в условиях априорной неопределенности, а также действии на объект управления внешних возмущений. Кроме того, в последнее время особенно актуальны задачи управления сетевыми (Multiagent) объектами управления в таких областях, как электроэнергетика, робототехника и т. д. Робастное управление позволяет компенсировать действие возмущений так, что при этом структура управляющего устройства остается неизменной [4–6].

В некоторых случаях при синтезе управления неучтенные запаздывания приводят к ухудшению качества переходных процессов и даже потере устойчивости [7, 8]. Поэтому присутствие запаздывания в математической модели объекта управления позволяет сделать эти системы близкими к реальным. Разные задачи управления объектами с запаздыванием решены в публикациях [1–13]. Так, например, с помощью H_∞ теории предложено решение задачи синхронизации для объекта с дискретным и распределенным запаздыванием [1]. В работе [9] с помощью метода внутренней модели решается задача компенсации возмущений в линейной системе с входным запаздыванием; в [10] с использованием теории графов и метода вспомогательного контура [4] решена задача синхронизации сети линейных объектов. Системы с запаздывающим управлением рассмотрены в [11].

Принцип динамической компенсации, суть которого заключается в том, чтобы предварительно исключить влияние возмущений на контур управления и далее решать задачу регулирования без учета возмущающих факторов, позволяет спроектировать эффективную автоматическую систему управления, учитывающую реальные условия функционирования [11].

Одним из подходов к решению задачи синтеза алгоритмов управления объектами с запаздыванием, в основе которых лежит принцип динамической компенсации, является робастное управление, предложенное в работе [4], суть которого заключается в том, чтобы предварительно выделить сигнал, который несет информациию о возмущениях и запаздывании, а затем компенсировать его действие на контур управления. Метод вспомогательного контура, предложенный в [4] профессором А.М. Цыкуновым, позволил решить целый ряд задач робастного управления различными объектами с последействием [12].

Алгоритмы управления, разработанные для объектов без запаздывания, требуют дополнительного рассмотрения, поскольку не все из них остаются работоспособными для систем, учитывающих эффект от запаздываний. В данной работе решается задача управления с эталонной моделью для сети динамических объектов с распределенным и дискретным запаздыванием. Для формирования управляющих воздействий в каждой локальной подсистеме, в отличие от работы [12], применяется регулятор [13]. С помощью метода

вспомогательного контура и двух наблюдателей Халила [14] формируется сигнал, несущий информацию о всех возмущениях и запаздывании, а далее оценивается и компенсируется его действие на объект управления с требуемой точностью. В отличие от работы [15] полученный алгоритм управления является децентрализованным, так как в каждом из локальных объектов управления осуществляется слежение за сигналом локальной эталонной модели. Достоинством предложенного алгоритма является то, что для формирования управляющих воздействий в каждом из локальных объектов требуется информация об измеренных только скалярных входах и выходах подсистемы.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим сеть, состоящую из r связных локальных объектов, математические модели которых имеют следующий вид:

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + D_i \int_{-h}^{0} \mathrm{y}_i(t+\theta)\,d\theta + B_i u_i(t) + \sum_{j=1, i\neq j}^{r} \Gamma_{ij} y_j(t-h) +$$

$$+\Gamma_i f_i(t),\ y_i(t) = L_i x_i(t), \quad x_i(\theta) = \varphi_i(\theta), \quad \theta \in [-h;0], \quad i = \overline{1,r}, \tag{1}$$

где $x_i \in R^{n_i}$, $y_i(t)$ и $u_i(t)$ – скалярные регулируемые выходные переменные локальных объектов и управляющие воздействия; h – время запаздывания; $\varphi_i(\theta)$ – непрерывные векторные начальные функции; $f_i(t)$ – внешние возмущения; A_i, D_i, B_i, Γ_{ij}, Γ_i, L_i – числовые матрицы соответствующих размерностей.

Качества переходных процессов для каждой из локальных подсистем задаются следующими эталонными моделями:

$$\dot{x}_{mi}(t) = A_{\mathrm{m}i} x_{mi}(t) + D_{mi} \int_{-h}^{0} y_{mi}(t+\theta)\,d\theta + B_{\mathrm{m}i} k_{mi} g_i(t),$$

$$y_{mi}(t) = C_i x_{mi}(t), \quad x_{mi}(\theta) = \varphi_{mi}(\theta), \quad \theta \in [-h;0], \quad i = \overline{1,r}, \tag{2}$$

где $x_{m\mathrm{i}} \in R^{n_i - m_i}$, $y_{mi}(t)$ и $g_i(t)$ – скалярные выходы и задающие воздействия локальных эталонных моделей; A_m, D_m, B_m, L_m – числовые матрицы соответствующих размерностей; $\varphi_{mi}(\theta)$ – непрерывные начальные векторные функции.

Требуется получить такое алгоритмическое обеспечение системы управления, чтобы выполнялось целевое условие

$$|y_i(t) - y_{mi}(t)| < \delta \quad \text{при} \quad t \geq T_0, \quad i = \overline{1,r}, \tag{3}$$

где $\delta > 0$ – достаточно малая величина, которая характеризует точность слежения по истечении времени T_0.

Предположения

1. Локальные объекты являются управляемыми.

2. Известно множество возможных значений элементов матриц A_i, D_i, B_i, Γ_i, Γ_{ij}, L_i.

3. Полиномы $L_i\left(I_{ni}s - A_i - D_i\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta\right)^{+} B_i$ – гурвицевы, где s – комплексная переменная в преобразовании Лапласа, $\left(I_{n_i}s - A_i - D_i\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta\right)^{+}$ – транспонированная матрица алгебраических дополнений матрицы $\left(I_{ni}s - A_i - D_i\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta\right)$, I_{ni} – единичная матрица размерности $n_i \times n_i$.

4. Функции $f_i(t)$ и $g_i(t)$ являются гладкими ограниченными функциями.

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Приведем уравнения (1), (2) к форме «вход-выход» и применим преобразование Лапласа. Тогда получим следующие уравнения в изображениях по Лапласу:

$$Q_{i1}(s)y_i(s) = Q_{i2}(s)\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta y_i(s) + \left(R_{i1}(s) + R_{i2}(s)\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta\right)u_i(s) +$$

$$+\sum_{j=1,i\neq i}^{r}\left(P_{1ij}(s) + P_{2ij}(s)\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta\right)e^{-hs}y_j(s) +$$

$$+\left(S_{i1}(s) + S_{i2}(s)\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta\right)f_i(s) + K_i(s); \qquad (4)$$

$$G_{0i1}(s)y_{mi}(s) = G_{0i2}(s)\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta y_{mi}(s) + k_{mi}G_m(s)g_i(s), \quad i = \overline{1,r}, \qquad (5)$$

где $$Q_{i1}(s) - Q_{i2}(s)\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta = \det\left(I_{ni}s - A_i - D_iL_i\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta\right),$$

$$R_{i1}(s) + R_{i2}(s)\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta = L_i\left(I_{ni}s - A_i - D_iL_i\int\limits_{-h}^{0} e^{s\theta}d\theta\right)^{+} B_i,$$

$$P_{1ij}(s)+P_{2ij}(s)\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta=L_i\left(I_{ni}s-A_i-D_iL_i\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta\right)^{+}\Gamma_{ij},$$

$$S_{i1}(s)+S_{i2}(s)\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta=L_i\left(I_{ni}s-A_i-D_iL_i\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta\right)^{+}\Gamma_{i},$$

$$G_{0i1}(s)-G_{0i2}(s)\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta=\det\left(I_{n_i-m_i}s-A_{0i}-D_{0i}C\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta\right),$$

$$\deg Q_{i1}(s)=n_i,\ \deg Q_{i2}(s)=n_i-1,\ \deg R_{i1}(s)=m_i,\ \deg R_{i2}(s)=m_i-1,$$
$$\deg P_{1ij}(s)=\rho_i,\ \deg P_{2ij}(s)=\rho_i-1,\ \deg S_{i1}(s)=\gamma_i,\deg S_{i2}(s)=\gamma_i-1,$$
$$n_i>m_i,\quad n_i>\gamma_i,\ n_i>\rho_i.$$

Для полиномов $Q_{i1}(s)$ и $Q_{i2}(s)$ применим алгоритм деления Евклида:

$$Q_{i1}(s)=G_{i1}(s)R_{i1}(s)+N_{i1}(s),$$

$$Q_{i2}(s)=G_{i2}(s)R_{i1}(s)+N_{i2}(s),$$

где

$$\deg G_{i1}(s)=n_i-m_i,\ \deg G_{i2}(s)=n_i-m_i-1,\quad \deg N_{i1}(s)<m_i,$$
$$\deg N_{i2}(s)<m_i.$$

Многочлены $G_{i1}(s)$ и $G_{i2}(s)$ представим в виде суммы двух составляющих, принимая во внимание (5):

$$G_{i1}(s)=G_{0i1}(s)+W_{i1}(s),\ G_{i2}(s)=G_{0i2}(s)+W_{i2}(s).$$

Тогда получим следующее представление многочленов $Q_{i1}(s)$ и $Q_{i2}(s)$:

$$Q_{i1}(s)=\left(G_{0i1}(s)+W_{i1}(s)\right)R_{i1}(s)+N_{i1}(s),$$

$$Q_{i2}(s)=\left(G_{0i2}(s)+W_{i2}(s)\right)R_{i1}(s)+N_{i2}(s).$$

Разделим обе части уравнения (4) на многочлен $\overline{R}_{i1}(s)=R_{i1}(s)/r_i$, в результате чего получим

$$G_{0i1}(s)y_i(s)=G_{0i2}(s)\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta y_i(s)+r_iu_i(s)+\overline{\psi}_i(t),\ \ i=\overline{1,r}.$$

Здесь

$$\overline{\varphi}_i(t)=\frac{1}{\overline{R}_{i1}(s)}\left(R_{i2}(s)\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta u_i(s)+\sum_{j=1,i\neq i}^{r}\left(P_{1ij}(s)+P_{2ij}(s)\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta\right)e^{-hs}y_j(s)+\right.$$

$$+\left(S_{i1}(s)+S_{i2}(s)\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta\right)f_i(s)+K_i(s)\Bigg)+\frac{(W_{i1}(s)R_{i1}(s)+N_{i1}(s)}{\overline{R}_{i1}(s)}y_i(s)+$$

$$+\frac{W_{i2}(s)R_{i1}(s)+N_{i2}(s)}{\overline{R}_{i1}(s)}\int_{-h}^{0}e^{s\theta}d\theta y_i(s)-k_{mi}g_i(s).$$

Составим уравнения для ошибок $e_i(s)=y_i(s)-y_{mi}(s)$:

$$G_{0i1}(s)e_i(s)=G_{0i2}(s)\int_{-h}^{0}e(t+\theta)\,d\theta e_i(s)+r_iu_i(s)+\overline{\psi}_i(s),\ i=\overline{1,r}.$$

Тогда последнее уравнение после применения обратного преобразования Лапласа примет следующий вид:

$$G_{0i1}(p)e_i(t)=G_{0i2}(p)\int_{-h}^{0}e(t+\theta)d\theta+r_iu_i(t)+\overline{\psi}_i(t),\ i=\overline{1,r}. \tag{6}$$

Применим алгоритм управления [13] для того, чтобы выделить сигналы, несущие информацию о функциях $\overline{\psi}_i(t)$.

Будем формировать законы управления в виде

$$u_i(t)=T(p)v_i(t), \tag{7}$$

если доступны измерению n_i-m_i-2 производных управляющих воздействий $v_i(t)$.

Тогда уравнение (6) примет вид

$$G_{0i1}(p)e_i(t)=G_{0i2}(p)\int_{-h}^{0}e(t+\theta)d\theta+r_iT(p)\nu_i(t)+\overline{\psi}_i(t),\ i=\overline{1,r}. \tag{8}$$

В случае невозможности измерения производных управляющих воздействий зададим законы управления в виде

$$u_i(t)=T(p)\overline{v}_i(t), \tag{9}$$

где $\overline{v}_i(t)$ – оценка сигнала $v_i(t)$, получаемая с наблюдателя [14]

$$\dot{\zeta}_i(t)=F_{0i}\zeta_i(t)+B_{0i}(v_i(t)-\overline{v}_i(t)),\ \overline{v}_i(t)=L\zeta_i(t). \tag{10}$$

Здесь $\zeta_i(t)\in R^{n_i-m_i}$, F_{0i} – матрица в форме Фробениуса с нулевой нижней строкой, $L=[1,0,...,0]$, $B_{0i}^T=\left[\frac{b_{1i}}{\mu},...,\frac{b_{(n_i-m_i)}}{\mu^{n_i-m_i}}\right]$. Параметры $b_{1i},...,b_{n_i-m_i}$ выбираются так, чтобы матрицы $F_i=F_{0i}+B_iL$ были гурвицевыми, $B_i^T=[b_{1i},...,b_{(n_i-m_i)i}]$.

Подставив (19) в (6), получим уравнение

$$G_{0i1}(p)e_i(t) = \beta r_i T(p) v_i(t) + \tilde{\psi}_i(t) + \beta r_i T(p)\left(\overline{v_i}(t) - v_i(t)\right), \qquad (11)$$

где $\tilde{\psi}_i(t) = \overline{\psi}_i(t) + G_{0i2}(p)\int\limits_{-h}^{0} e(t+\theta)d\theta.$

Полиномы $r_i T_i(\mathrm{s})$ будем выбирать таким образом, чтобы передаточные функции удовлетворяли условию $r_i T_i(s)/G_{0i1}(s) = 1/s + a_m$. Тогда уравнение (11) преобразуется к виду

$$(p + a_m)e_i(t) = \beta v_i(t) + \tilde{\varphi}_i(t), \qquad (12)$$

где $\tilde{\varphi}_i(t) = \left(1/r_i T_i(p)\right)\tilde{\psi}(t) + \beta\left(\overline{v_i}(t) - v_i(t)\right).$

Введем вспомогательные контуры

$$(p + a_m)\overline{e_i}(t) = \beta v_i(t), \qquad (13)$$

и сигналы рассогласований $\zeta_i(t) = e_i(t) - \overline{e_i}(t)$, откуда с учетом (12) и (13) получим $(p + a_m)\zeta_i(t) = \tilde{\varphi}_i(t)$.

Будем формировать сигналы $v_i(t)$ в виде

$$v_i(t) = -\frac{1}{\beta}(p + a_m)\zeta_i(t), \qquad (14)$$

если измерению доступны $n_i - m_i - 2$ производные сигнала $v_i(t)$ и первая производная регулируемой величины $e_i(t)$. Получим, что законы управления (7) и (14) обеспечивают асимптотическую устойчивость систем (6), (7) и (14) по переменным $e_i(t)$, а уравнение замкнутых систем будет иметь вид $(p + a_m)\, e_i(t) = 0$.

В случае невозможности измерений производных сигналов рассогласований $\zeta_i(t)$ зададим законы управления в виде

$$v_i(t) = -\frac{1}{\beta}(p + a_m)\overline{\zeta_i}(t), \qquad (15)$$

где $\overline{\zeta_i}(t)$ – оценка сигнала $\zeta_i(t)$, получаемая с наблюдателя [14]

$$\dot{z}_i(t) = \frac{b_1}{\mu}(\zeta_i(t) - z_i(t), \ \overline{\zeta_i}(t) = z_i(t). \qquad (16)$$

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений 1–4, тогда для любого $\delta > 0$ в (1) существуют числа $\mu > 0$, $T > 0$ такие, что для $\mu \le \mu_0$ и $t \ge T$ для системы (1), (2), (6), (9), (13), (15), (16) выполнены целевые условия (3) и все переменные в системе ограничены.

Доказательство утверждения аналогично доказательству утверждения, которое приведено в работе [12].

3. ЧИСЛОВОЙ ПРИМЕР

Рассмотрим сеть из трех объектов управления, динамические процессы в каждом из которых описываются дифференциальными уравнениями с распределенными и дискретными запаздыванием:

$$\dot{x}_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \int_{-3}^{0} y_1(t+\theta)\,d\theta + \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{12} \\ d_{13} \end{bmatrix} \big(y_2(t-3) + y_3(t-3)\big) +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} f, \quad y_1 = [1\,0\,0]\,x_1,$$

$$\dot{x}_2 = \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 0 \\ a_2 & 0 & 1 \\ a_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_2 + \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \int_{-3}^{0} y_2(t+\theta)\,d\theta + \begin{bmatrix} d_{21} \\ d_{22} \\ d_{23} \end{bmatrix} \big(y_1(t-3) + y_3(t-3)\big) +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ -3 \end{bmatrix} f_2, \quad y_2 = [1\,0\,0]\,x_2,$$

$$\dot{x}_3 = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} x_3 + \begin{bmatrix} q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} \int_{-3}^{0} y_3(t+\theta)\,d\theta + \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ d_{33} \end{bmatrix} \big(y_1(t-3) + y_2(t-3)\big) +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} u_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ -3 \end{bmatrix} f_3, \quad y_3 = [1\,0\,0]\,x_3.$$

Будем решать задачу децентрализованного управления трех подсистем, как отмечено в предположении 2, в условиях параметрической неопределенности. Класс неопределенности можно описать следующими диапазонами изменений элементов матриц математической модели:

$$1 \le a_{ij} \le 3,\ i \ne j,\ -3 \le a_{11} \le 1,\ -3 \le a_{22} \le 1,$$

$$-3 \le a_{33} \le 2,\ \ -3 \le d_{ij} \le 3,\ 1 \le b \le 8,\ -5 \le a_i \le 5,$$

$$-5 \le q_i \le 5,\ \ -3 \le d_{ij} \le 3,\ \ i, j = \overline{1,3},$$

$$2 \le b_k \le 5,\ k = \overline{1,3},\ -4 \le q_l \le 5,\ \ l = \overline{1,6}.$$

Относительная степень всех трех эталонных моделей локальных подсистем равна двум ($n_i - m_i = 3 - 1 = 2$). Возьмем одинаковые математические модели эталонных систем

$$\dot{x}_m = \begin{bmatrix} -7 & 1 \\ -12 & 0 \end{bmatrix} x_m + \begin{bmatrix} -2 \\ -1 \end{bmatrix} \int_{-3}^{0} \mathrm{y}_m(t+\theta)\,d\theta + \begin{bmatrix} 0 \\ 12 \end{bmatrix} g_{\mathrm{i}}, \; y_{mi} = [1 \;\; 0] x_{mi}.$$

Следуя предложенным в данной работе алгоритмам управления, выберем следующее:

- полином $T(\lambda) = 4\lambda^2 + 4\lambda + 1$, $\beta = 10$, $\mu = 0{,}01$, $a_m = 3$;
- вспомогательные контуры (13) в виде $(p+3)\bar{e}_i(t) = 10 v_i(t)$,
- уравнения наблюдателей (10) и (16) в виде

$$\begin{cases} \dot{\varsigma}_{1i}(t) = \varsigma_{2i}(t) + \dfrac{6}{\mu}(v_i(t) - \varsigma_{1i}(t)), \\ \dot{\varsigma}_{2i}(t) = \dfrac{8}{\mu^2}(v_i(t) - \varsigma_{1i}(t)), \\ \overline{v_i}(t) = \varsigma_{1i}(t), \quad i = \overline{1,3}, \end{cases} \qquad \begin{cases} \dot{z}_i(t) = \dfrac{a_m}{\mu}(\zeta_i(t) - z_i(t)), \\ \overline{\zeta_i}(t) = z_i(t), \; i = \overline{1,3}; \end{cases}$$

- управляющие воздействия (9) и (14) в виде

$$u_i(t) = 4\varsigma_{1i}(t) + 4\varsigma_{2i}(t) + \dot{\varsigma}_{2i}(t),$$

$$v_i(t) = -\frac{1}{10}(3\zeta_i(t) + \dot{z}_i(t)).$$

Моделирование предложенных алгоритмов управления будем осуществлять в пакете Simulink среды Matlab:

$$\dot{x}_1 = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 1 \\ 4 & -3 & 1 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} 5 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix} \int_{-3}^{0} y_1(t+\theta)\,d\theta + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ -1 \end{bmatrix} \big(y_2(t-3) + y_3(t-3)\big) +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} f_1, \quad y_1 = [1\,0\,0]\, x_1,$$

$$\dot{x}_2 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_2 + \begin{bmatrix} 5 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix} \int_{-3}^{0} y_2(t+\theta)\,d\theta + \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \big(y_1(t-3) + y_3(t-3)\big) +$$

$$+\begin{bmatrix}0\\2\\5\end{bmatrix}u_2+\begin{bmatrix}0\\2\\-3\end{bmatrix}f_2,\quad y_2=[1\,0\,0]x_2,$$

$$\dot{x}_3=\begin{bmatrix}-1&1&1\\4&-1&1\\3&2&1\end{bmatrix}x_3+\begin{bmatrix}4\\4\\1\end{bmatrix}\int_{-3}^{0}y_3(t+\theta)\,d\theta+\begin{bmatrix}1\\-3\\1\end{bmatrix}\big(y_1(t-3)+y_2(t-3)\big)+$$

$$+\begin{bmatrix}0\\1\\2\end{bmatrix}u_3+\begin{bmatrix}0\\2\\-3\end{bmatrix}f_3,\quad y_3=[1\,0\,0]x_3.$$

На рис. 1 представлены переходные процессы по выходам локальных подсистем управления и эталонных моделей.

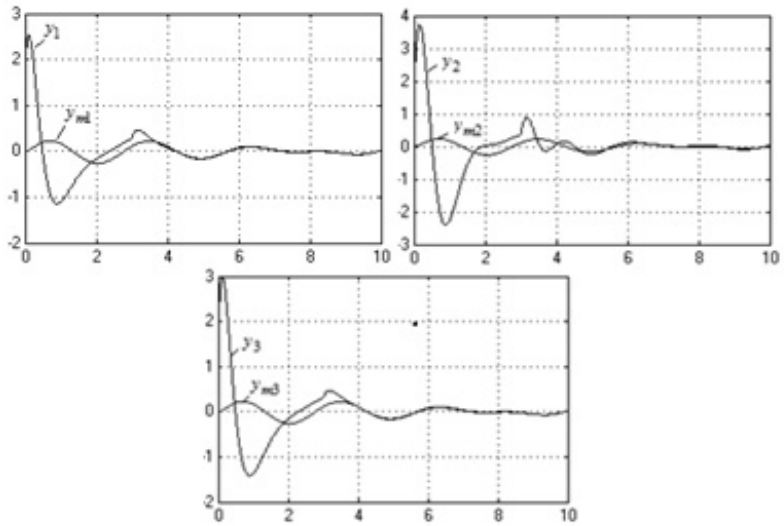


Рис. 1. Переходные процессы по выходам локальных подсистем $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$ и эталонных моделей $y_{m1}(t)$, $y_{m2}(t)$, $y_{m3}(t)$

Fig. 1. Transient processes at the outputs of local subsystems $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$ and reference models $y_{m1}(t)$, $y_{m2}(t)$, $y_{m3}(t)$

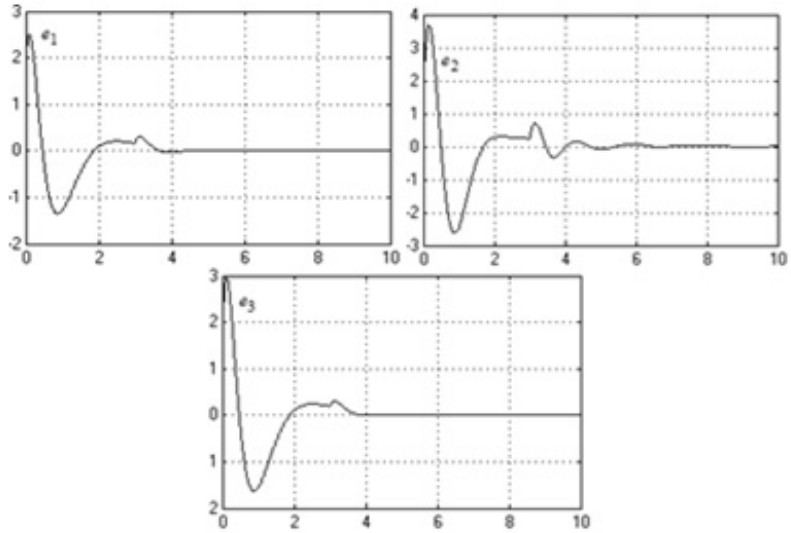


Рис. 2. Переходные процессы по ошибкам слежения $e_1(t),\ e_2(t),\ e_3(t)$

Fig. 2. Transient processes by tracking e*rrors* $e_1(t),\ e_2(t),\ e_3(t)$

На рис. 2 представлены переходные процессы по ошибкам слежения в каждом из трех локальных объектов управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено решение задачи управления сетью объектов, математическими моделями которых являются дифференциальные уравнения с распределенным и дискретным запаздыванием. Робастное управление, предложенное автором ранее для объекта с распределенным запаздыванием [13], используется для формирования управляющих воздействий в каждом из локальных объектов сети. Компенсация действия внешних и внутренних возмущений в каждой из локальных подсистем осуществляется с помощью вспомогательного контура и двух наблюдателей производных переменных системы управления. Применение наблюдателей переменных обусловлено необходимостью получения оценок производных переменных системы, измерение которых недоступно. Таким образом выбранная схема формирования управляющего воздействия позволяет выделить сигнал, который несет информацию о неизвестных параметрах математической модели, распределенном и дискретным запаздывании. В отличие от работы [15] полученный алгоритм управления является децентрализованным, так как в каждом из локальных объектов управления осуществляется слежение за сигналом локальной эталонной модели. Достоинством предложенного алгоритма является тот факт, что для формирования управляющих воздействий в каждом из локальных объектов требуются измерения только скалярных входа и выхода подсистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Karimi H.R.* Robust adaptive H∞ synchronization of master-slave systems with discrete and distributed time-varying delays and nonlinear perturbations // Preprints of the 18th IFAC World Congress. – Milano, 2011. – P. 302–307.

2. *Schiffer J., Dorfler F., Fridman E.* Robustness of distributed averaging control in power systems: time delays and dynamic communication topology // Automatica. – 2017. – Vol. 80. – P. 261–271.

3. *Morarescu I.-C, Michiels W., Jungers M.* Effect of a distributed delay on relative stability of diffusely coupled systems, with application to synchronized equilibria // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2016. – Vol. 26, N 7. – P. 1565–1582.

4. *Цыкунов А.М.* Робастное управление с компенсацией возмущений. – М.: Физматлит, 2014.

5. *Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С.* Управление линейными системами при внешних возмущениях: техника линейных матричных неравенств. – М.: Ленанд, 2014.

6. *Цыкунов А.М.* Робастное управление линейными объектами с переключениями // Проблемы управления. – 2017. – № 4. – С. 2–7.

7. *Колмановский В.Б., Носов В.Г.* Устойчивость и периодические режимы систем с последействием. – М.: Наука, 1981. – 448 с.

8. *Кирьянен А.И.* Устойчивость систем с последействием и их приложения. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1994. – 235 с.

9. *Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O.* Adaptive disturbance compensation in linear systems with input arbitrary delay: internal model approach // 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – Lisbon, Portugal, 2016. – P. 304–309.

10. *Furtat I.B., Fradkov A.L., Tsykunov A.M.* Robust synchronization of linear networks with compensation of disturbances // Proceedings of the 18th IFAC World Congress on Automatic Control. – Milan, 2011. – P. 1255–1260.

11. *Филимонов А.Б.* Спектральная декомпозиция систем с запаздыванием. Компенсация запаздывания. – М.: Физматлит, 2002.

12. *Цыкунов А.М.* Робастное управление объектами с последействием. – М.: Физматлит, 2014.

13. *Имангазиева А.В.* Робастная система слежения за эталонным сигналом линейного динамического объекта с распределенным запаздыванием // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 4. – С. 7–13.

14. *Atassi A.N., Khalil H.K.* Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1999. – Vol. 44, N 9. – P. 1672–1687.

15. *Имангазиева А.В.* Синхронизация сети линейных динамических объектов с распределенным запаздыванием // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 4 (65). – С. 19–32.

Имангазиева Алия Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая и прикладная математика» Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез робастных систем автоматического управления. Имеет 15 публикаций. E-mail:aliya111@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-59-72

Compensation of disturbances in the problem of robust control of a plant network with distributed and discrete delays[*]

A.V. IMANGAZIEVA

Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation

aliya111@yandex.ru

Abstract

A solution is proposed for the control of a network of plants whose mathematical models are differential equations with distributed and discrete delays. Robust control suggested by the author earlier for a plant with a distributed delay is used to generate control actions in each of the local plants of the network. Compensation for the action of external and internal disturbances in each of the local subsystems is accomplished with the aid of an auxiliary circuit and two observers of the derivative variables of the control system. The use of variable observers is due to the need to obtain estimates of the derived variables of the system, the measurement of which is not available. Thus, the selected scheme for forming the control effect allows us to isolate a signal that carries information about unknown parameters of the mathematical model as well as about distributed and discrete delays. The received control algorithm is a decentralized one since in each of the local control plants the signal of the local reference model is tracked. An advantage of the proposed algorithm is the fact that for the formation of control actions in each of the local plants only measurements of the scalar input and output of the subsystem are required. A numerical example of a network control system consisting of three dynamic plants with distributed and discrete delays is given. The proposed decentralized control algorithm is applied to a network of plants. Numerical simulation in the Simulink Matlab package is carried out and graphs of transients based on tracking errors, plant outputs and reference models for each of the three subsystems are given. The simulation results confirmed our theoretical conclusions and showed good performance of the proposed decentralized control algorithm under conditions of constantly acting external and internal disturbances.

Keywords: network, robust control, limited perturbations, accuracy, distributed delay, discrete delay, control algorithm, Khalil's observer, auxiliary circuit method

REFERENCES

1. Karimi H.R. Robust adaptive H∞ synchronization of master-slave systems with discrete and distributed time-varying delays and nonlinear perturbations. *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, Milano, 2011, pp. 302–307.

2. Schiffer J., Dorfler F., Fridman E. Robustness of distributed averaging control in power systems: time delays and dynamic communication topology. *Automatica*, 2017, vol. 80, pp. 261–271.

3. Morarescu I.-C, Michiels W., Jungers M. Effect of a distributed delay on relative stability of diffusely coupled systems, with application to synchronized equilibria. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, vol. 26, no. 7, pp. 1565–1582.

4. Tsykunov A.M. *Robastnoe upravlenie s kompensatsiei vozmushchenii* [Robust control with compensation of disturbances]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014.

5. Polyak B.T., Khlebnikov M.V., Shcherbakov P.S. *Upravlenie lineinymi sistemami pri vneshnikh vozmushcheniyakh: tekhnika lineinykh matrichnykh neravenstv* [Control of linear systems subjected to exogenous disturbances: the linear matrix inequality technique]. Moscow, Lenand Publ., 2014.

[*] *Received 06 April 2018.*

6. Tsykunov A.M. Robastnoe upravlenie lineinymi ob"ektami s pereklyucheniyami [Robust control of linear systems]. *Problemy upravleniya – Control Sciences*, 2017, no. 4, pp. 2–7.

7. Kolmanovskii V.B., Nosov V.G. *Ustoichivost' i periodicheskie rezhimy sistem s posledeistviem* [Stability and periodic regimes of systems with aftereffect]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 448 p.

8. Kir'yanen A.I. *Ustoichivost' sistem s posledeistviem i ikh prilozheniya* [Stability of systems with aftereffect and their applications]. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 1994. 235 p.

9. Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O. Adaptive disturbance compensation in linear systems with input arbitrary delay: internal model approach. *8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Lisbon, Portugal, 2016, pp. 304–309.

10. Furtat I.B., Fradkov A.L., Tsykunov A.M. Robust synchronization of linear networks with compensation of disturbances. *Proceedings of the 18th IFAC World Congress on Automatic Control*, Milan, 2011, pp. 1255–1260.

11. Filimonov A.B. *Spektral'naya dekompozitsiya sistem s zapazdyvaniem. Kompensatsiya zapazdyvaniya* [Spectral decomposition of systems with delay. Compensation for lag]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002.

12. Tsykunov A.M. *Robastnoe upravlenie ob"ektami s posledeistviem* [Robust control of plants with residual effect]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014.

13. Imangazieva A.V. Robastnaya sistema slezheniya za etalonnym signalom lineinogo dinamicheskogo ob"ekta s raspredelennym zapazdyvaniem [Robust tracking control reference signal of a linear dynamic plant with distributed delay]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2015, no. 4, pp. 7–13.

14. Atassi A.N., Khalil H.K. Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, vol. 44, no. 9, pp. 1672–1687.

15. Imangazieva A.V. Sinkhronizatsiya seti lineinykh dinamicheskikh ob"ektov s raspredelennym zapazdyvaniem [Synchronization of a linear dynamic plant network with a distributed lag]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (65), pp. 19–32.

Для цитирования:

Имангазиева А.В. Компенсация возмущений в задаче робастного управления сетью объектов с распределенным и дискретным запаздыванием // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 59–72. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-59-72.

For citation:

Imangazieva A.V. Kompensatsiya vozmushchenii v zadache robastnogo upravleniya set'yu ob"ektov s raspredelennym i diskretnym zapazdyvaniyem [Compensation of disturbances in the problem of robust control of a plant network with distributed and discrete delays]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 59–72. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-59-72.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 73–86

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 73–86

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.852 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-73-86

Нейро-нечеткая классификация объектов и их состояний*

А.М. КОРИКОВ[1, 2, a], А.Т. НГУЕН[2, b]

[1] *634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*
[2] *634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

[a] *korikov@asu.tusur.ru* [b] *nguyenanhtu@tpu.ru*

В работе представлена разработка и исследование нейронной нечеткой сети (ННС) для решения задач классификации биологических объектов и их состояний. Рассмотрен общий подход к задачам автоматической классификация объектов. Постановка задач классификации объектов представлена на типовом наборе данных ирисы Фишера, а оценка эмоционального состояния объектов – на наборе данных шкалы баланса. ННС является комбинацией систем нечеткого вывода и нейронной сети. Структура ННС представляет собой многослойную однонаправленную сеть, состоящую из следующих слоев: входной слой, слой нечетких функций активации (ФА), слой фаззификации, слой дефаззификации, слой нормализации и выходной слой. В слое нечетких ФА используются нечеткие ФА, разработанные и исследованные с участием авторов. Представлены четыре вида нечетких ФА, поэтому разрабатываются и исследуются четыре вида ННС. Обучение ННС – определение антецедентных параметров сети – осуществляется с помощью метода кластеризации К-средних. В обучении ННС используется алгоритм масштабированного сопряженного градиента (SCG), который позволяет снизить трудоемкость поиска линий на каждую итерацию обучения, что повышает его быстродействие. Тестирование ННС выполнено на наборах данных ирисы Фишера и шкалы баланса. Эти наборы данных являются классическими и часто используются на практике для иллюстрации работы различных статистических алгоритмов классификации. Эксперименты с разными видами нечетких ФА подтверждают эффективность применения ННС для решения задач классификации. Выполнен сравнительный анализ ННС предлагаемых четырех видов и известной ННС с гауссовой ФА по эффективности и точности классификации.

Ключевая слова: нейронная нечеткая сеть, классификация, нечеткие функции активации, алгоритм масштабированного сопряженного градиента, ирисы Фишера, шкалы баланса, эффективность классификации, точность классификации

* *Статья получена 18 апреля 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Старт исследованиям по теории нейронных сетей (НС) и внедрению нейросетевых технологий (НСТ) во многие направления науки и техники был дан в 1943 г. работой У. МакКаллока и У. Питса [1]. Теория НС и НСТ развивается в рамках обширнейшей области науки и техники – искусственного интеллекта (ИИ) [2]. В естественных и технических науках задачи делятся на формализуемые и неформализуемые. Постановка любой задачи заключается в том, чтобы перевести ее словесное, вербальное описание в формальное. В случае относительно простых задач такой переход осуществляется в сознании (естественном интеллекте (ЕИ)) человека. Если полученная формальная модель (математическая зависимость между величинами в виде формулы, уравнения, системы уравнений) опирается на фундаментальный закон или подтверждается экспериментом, то этим доказывается ее адекватность отображаемой ситуации, и модель рекомендуется для решения задач соответствующего класса [3]. Неформализуемые задачи (НФ-задачи) невозможно представить, используя только ЕИ человека, в виде каких-то формальных моделей. С развитием науки и техники количество таких НФ-задач постоянно растет. Для их решения развиваются специальные приемы и методы, обобщенные в теории систем и системном анализе [3], создаются экспертные системы – интеллектуальные системы (ИС), основанные на знаниях [4]. Роль методов ИИ, теории НС и НСТ в реализации методик системного анализа и разработке ИС трудно переоценить. Решение НФ-задач осложняется различными видами НЕ-факторов знаний [4]: неопределенность, нечеткость, неточность, недоопределенность и неполнота знаний эксперта о свойствах проблемной области.

Спектр задач, решаемых на основе НСТ, постоянно расширяется. Некоторое время считалось, что НСТ эффективны при решении трудноформализуемых задач и НФ-задач, для которых необходимо включение в алгоритм их решения процесса обучения на результатах реального эксперимента [1]. В основном это были задачи распознавания образов. В последние годы к ним добавились задачи обработки сигналов и изображений, распараллеливание которых повышает эффективность (например, скорость их решения). Эти задачи не требуют обучения на результатах реального эксперимента, но они хорошо представимы в нейросетевом логическом базисе [1].

В настоящей работе решаются задачи автоматической классификации объектов и их состояний. Общий подход к задачам автоматической классификация объектов изложен в [5]. Согласно этому подходу эмпирические данные представляются в виде матрицы данных Z, строки которой соответствуют различным наблюдаемым объектам, а столбцы – параметрам, описывающим состояние каждого объекта. Если параметры имеют различный физический смысл, то осуществляется преобразование матрицы данных Z в стандартизованную матрицу данных X. Формулы преобразования Z в X приведены в [5]. Матрице данных ставится в соответствие корреляционная матрица R, элементами которой являются выборочные коэффициенты корреляции r_{ij}, пропорциональные скалярному произведению двух вектор-столбцов матрицы данных – скалярное произведение i-го вектор-столбца и j-го вектор-столбца. Коэффициент корреляции является удобным показате-

лем «близости» или «связи» между параметрами. На этой основе разработаны многие структурные методы обработки эмпирических данных, в том числе методы автоматической классификация объектов, образов и изображений [5]. Задача классификации объектов трактуется как геометрическая задача о выделении в пространстве классификационных признаков «плотных» скоплений точек. Для ее решения необходимо задание правила отнесения любого объекта к тому или иному классу. Подобные задачи сформулированы и решены в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях. Однако поиск эффективных решений задач классификации объектов и их состояний продолжается. В настоящей работе для решения задач классификации объектов и их состояний разрабатывается и исследуется нечеткая НС, базирующаяся на нечетких функциях активации (ФА), предложенных авторами в [6, 7], и алгоритме масштабированного сопряженного градиента (SCG) [8].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Нейронная сеть представляет собой сложные отношения между входами и выходами [1, 2]. На основе объединения результатов теории нейронных сетей и теории нечетких множеств возможно создание оригинальных интеллектуальных систем [10]. Нечеткие системы, как правило, не учатся и не приспосабливаются [11], в то время как нейронные сети обладают способностью к самообучению и самоорганизации. По этим причинам вполне логично создание нейро-нечетких систем, которые представляют собой комбинацию систем нечеткого вывода и нейронной сети. Нейро-нечеткая система представляет собой нечеткую нейронную сеть, которая включает в себя систему нечетких выводов, преодолевает некоторые ограничения нейронных сетей и расширяет пределы нечетких систем. В известных нечетких нейронных системах – нейро-нечетких классификаторах (ННК) – каждый узел сети описывается параметризованной колоколообразной функцией активации (ФА) или гауссовой ФА. В наших работах [6, 7] предлагаются новые модели нечетких НС (ННС), использующих импульсные нечеткие ФА нейронов ННС. Поставим задачу разработки ННК на основе этих нейронов, обучения ННК алгоритма масштабированного сопряженного градиента (SCG) и исследования возможности ННК для решения задач классификации объектов и их состояний. Для тестирования ННК выберем классические наборы данных: ирисы Фишера и шкалы баланса. Ирисы Фишера – это набор данных для задачи классификации, на примере которого Рональд Фишер в 1936 году продемонстрировал эффективность разработанного им метода дискриминантного анализа [11]. Этот набор данных стал уже классическим и часто используется для иллюстрации эффективности работы различных статистических алгоритмов. Шкалы баланса также являются классическим набором данных для задачи классификации. Этот набор данных предложен Зиглером [12] и описывает процесс взвешивания с использованием шкалы баланса. Исследование проведено с помощью средств компьютерного моделирования MATLAB [13].

2. НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ КЛАССИФИКАТОР

Задача нечеткой классификации – это задача разбиения пространства классификационных признаков на нечеткие классы. Можно описать пространство классификационных признаков с нечеткими областями и управлять каждой областью с помощью нечетких правил [14]. Типичное нечеткое правило классификации P_i, которое демонстрирует связь между пространством входных данных и классами, выглядит следующим образом:

$$P_i: \text{если } x_{s1} - A_{i1} \text{ и } \ldots\ x_{sj} - A_{ij} \ldots \text{ и } x_{sn} - A_{in}, \text{ то класс} - C_k,$$

где x_{sj} представляет *j*-й входной элемент *s*-й выборки; A_{ij} обозначает нечеткое множество *j*-го входного элемента в -м правиле; C_k представляет собой метку *k*-го класса. A_{ij} определяется соответствующей функцией принадлежности.

Для достижения этой цели нечеткий параметр функции принадлежности [9] и нечеткий кластер должны быть оптимизированы. Когда правила нечеткой классификации строятся как сеть, то их параметры могут быть адаптированы к нейронной сети. В результате системы с нечеткой классификацией и нейронные сети могут быть объединены с сохранением их положительных свойств. Комбинированная система называется нейро-нечетким классификатором, который представляет собой адаптивную сеть с несколькими входами и несколькими выходами [16].

Нейро-нечеткий классификатор представляет собой многослойную однонаправленную сеть, состоящую из следующих слоев: входной слой, слой нечетких ФА, слой фаззификации, слой дефаззификации, слой нормализации и выходной слой. Классификатор имеет несколько входов и несколько выходов. На рис. 1 изображен ННК с двумя классификационными признаками и тремя классами. Каждый вход определяется тремя лингвистическими переменными. Таким образом, существует девять нечетких правил.

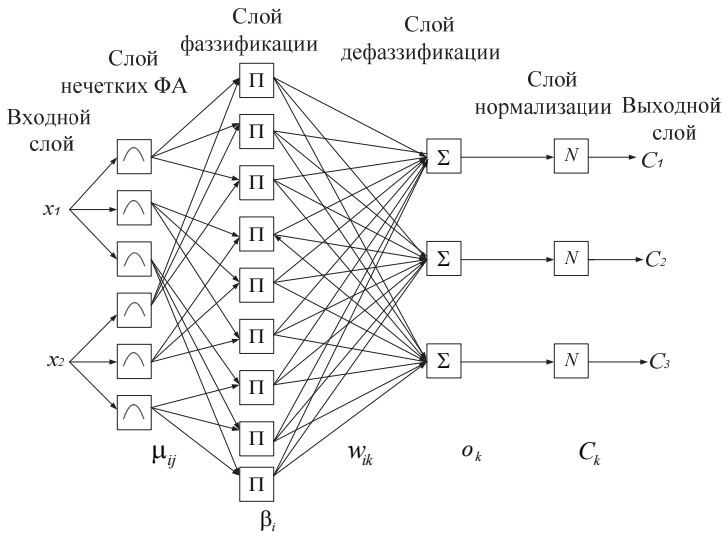


Рис. 1. Структура нейро-нечеткого классификатора

Fig. 1. The structure of a neuro-fuzzy classifier

Слой нечетких ФА. Функция активации для каждого входа идентифицируется в этом слое. В данной работе используется четыре вида нечетких ФА [6, 7]. На рис. 2 показан внешний вид этих ФА.

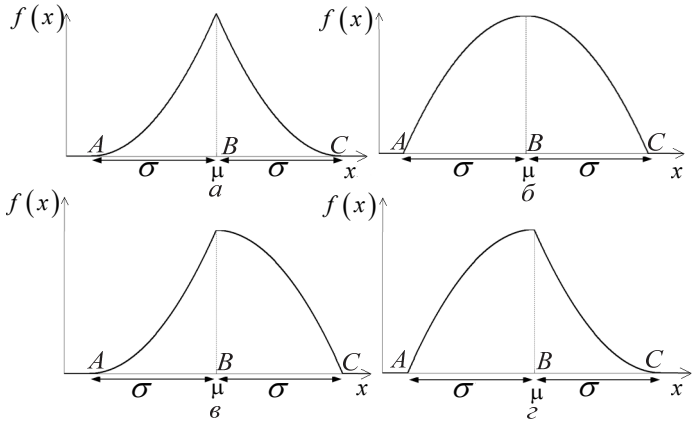


Рис. 2. Внешний вид ФА

Fig. 2. The appearance of AF

Набор точек $\langle A,B,C\rangle$ является характеристическими точками ФА. Задаем $AB = BC = \sigma$ и $B = \mu$. Пусть $a = (\mu - \sigma)$, $k_1 = 0$, $k_2 = 1$, если $\mu - \sigma \le x \le \mu$ и $a = (\mu + \sigma)$, $k_1 = 1$, $k_2 = 0$, если $\mu \le x \le (\mu + \sigma)$, тогда получим 4 ФА соответственно:

$$а)\begin{cases} f_{ij}(x_{sj}) = \dfrac{1}{\sigma_{ij}^2} x_{sj}^2 + \dfrac{-2a_{ij}}{\sigma_{ij}^2} x_{sj} + \dfrac{a_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2}, \\ f_{ij}(x_{sj}) = 0, \textit{иначе}; \end{cases}$$

$$б)\begin{cases} f_{ij}(x_{sj}) = \dfrac{-1}{\sigma_{ij}^2} x_{sj}^2 + \dfrac{2\mu_{ij}}{\sigma_{ij}^2} x_{sj} + \dfrac{a_{ij}^2 - 2\mu_{ij} a_{ij}}{\sigma_{ij}^2}, \\ f_{ij}(x_{sj}) = 0, \textit{иначе}; \end{cases}$$

$$в)\begin{cases} f_{ij}(x_{sj}) = k_1\left(\dfrac{1}{\sigma_{ij}^2} x_{sj}^2 + \dfrac{-2a_{ij}}{\sigma_{ij}^2} x_{sj} + \dfrac{a_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2}\right) + \\ \qquad + k_2\left(\dfrac{-1}{\sigma_{ij}^2} x_{sj}^2 + \dfrac{2\mu_{ij}}{\sigma_{ij}^2} x_{sj} + \dfrac{a_{ij}^2 - 2\mu_{ij} a_{ij}}{\sigma_{ij}^2}\right), \\ f_{ij}(x_{sj}) = 0, \textit{иначе}; \end{cases}$$

$$г)\begin{cases} f_{ij}(x_{sj}) = k_1\left(\dfrac{-1}{\sigma_{ij}^2}x_{sj}^2 + \dfrac{2\mu_{ij}}{\sigma_{ij}^2}x_{sj} + \dfrac{a_{ij}^2 - 2\mu_{ij}a_{ij}}{\sigma_{ij}^2}\right) + \\ \qquad + k_2\left(\dfrac{1}{\sigma_{ij}^2}x_{sj}^2 + \dfrac{-2a_{ij}}{\sigma_{ij}^2}x_{sj} + \dfrac{a_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2}\right), \\ f_{ij}(x_{sj}) = 0, \textit{ иначе.} \end{cases}$$

Слой фаззификации. Каждый узел в этом слое генерирует сигнал, соответствующий степени выполнения нечеткого правила для выборки. Этот сигнал можно назвать степенью возбуждения нечеткого правила в отношении объекта, подлежащего классификации. Степень возбуждения по этому правилу заключается в следующем:

$$\beta_{is} = \prod_{j=1}^{N} f_{ij}(x_{sj}), \tag{1}$$

где N – количество классификационных признаков.

Слой дефаззификации. В этом слое вычисляются веса выходов; каждое правило влияет на каждый класс в соответствии с их весами. Если правило управляет определенной областью класса, вес между этим выходом правила и конкретным классом будет больше, чем другие веса. В противном случае веса классов малы. Вес выхода для s-й выборки, относящейся к k-му классу, вычисляется следующим образом:

$$o_{sk} = \sum_{i=1}^{U} \beta_{is} w_{ik}, \tag{2}$$

где w_{ik} обозначает степень принадлежности к k-му классу, который контролируется i-м правилом и U представляет собой количество правил; o_{sk} обозначает весовой выход для s-й выборки, принадлежащей k-му классу.

Слой нормализации. Выходы сети должны быть нормализованы, так как суммирование весов может быть больше чем 1, в некоторых случаях

$$h_{sk} = \frac{o_{sk}}{\sum_{l=1}^{K} o_{sl}} = \frac{o_{sk}}{\delta_s}, \ \delta_s = \sum_{l=1}^{K} o_{sl}, \tag{3}$$

где h_{sk} представляет нормированное значение выхода для s-й выборки, которая относится к k-му классу, и K – количество классов. После этого метка класса s-й выборки определяется максимальным значением как

$$C_s = \max_{k=1,2,\ldots,K} \{h_{sk}\}, \tag{4}$$

где C_s обозначает метку класса для s-й выборки.

Антецедентные параметры сети $\theta = \{S_{M\times N},\ C_{M\times N},\ W_{M\times K}\}$ [17] могут быть адаптированы любым методом оптимизации S и C – матриц, содержащих значения σ и μ соответственно; W представляет весовую матрицу соединений от слоя фаззификации до слоя дефаззификации; M, N, K – количество правил, признаков и классов соответственно; метод кластеризации К-средних используются для получения исходных параметров матриц S и C. В данной работе метод масштабированного сопряженного градиента (SCG) используется для адаптации параметров сети. SCG – это алгоритм сопряженного градиента второго порядка [16], который минимизирует целевые функции нескольких переменных. Теоретическая основа этого алгоритма была доказана Моллером. Этот алгоритм относится к методам первого порядка, использующих первые производные. SCG использует механизм масштабирования размера шага, который позволяет избежать трудоемкого поиска линий на каждую итерацию обучения, что повышает его быстродействие. Основанный на работе Моллера [8], метод SCG показывает суперлинейную конвергенцию [18] при решении многих задач.

Параметр w_{ik} также можно адаптировать с помощью метода SCG. Однако при обучении w_{ik} может быть больше 1. В этих случаях значения весов могут быть потеряны для кластеров из этого же класса. По этой причине либо w_{ik} должен быть ограничен, либо w_{ik} определяется из отношения числа выборки k-го класса в i-й области нечеткого правила относительно общего числа выборок k-го класса:

$$w_{ik} = \frac{D_i}{D_k}, \tag{5}$$

где D_i – число выборок k-го класса, которые принадлежат к i-й нечеткой области правил и D_k – число всех выборок k-го класса.

Функция стоимости, используемая в методе SCG, определяется из наименьших средних квадратов разностной цели и вычисленного значения класса

$$E = \frac{1}{N}\sum_{s=1}^{N} E_s\ , \tag{6}$$

$$E_s = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{K} (t_{sk} - h_{sk})^2\ , \tag{7}$$

где N – количество выборок, t_{sk} и h_{sk} являются целевыми и вычисленными значениями s-й выборки, принадлежащей k-му классу соответственно. Если s-я выборка принадлежит k-му классу, целевое значение t_{sk} устанавливается равным 1 и в противном случае равно 0.

Частную производную от E, относящуюся к μ_{ij}, можно вычислить так:

$$\frac{\partial E}{\partial \mu_{ij}} = \sum_{s=1}^{N} \frac{\partial E}{\partial E_s} \left(\sum_{k=1}^{K} \sum_{k=1}^{K} \frac{\partial E_s}{\partial h_{sk}} \frac{\partial h_{sk}}{\partial o_{sk}} \frac{\partial o_{sk}}{\partial \beta_{is}} \frac{\partial \beta_{is}}{\partial f_{ijs}} \frac{\partial f_{ijs}}{\partial \mu_{ij}} \right). \quad (8)$$

Для функции активации вида *б*

$$\begin{cases} f_{ij}(x_{sj}) = \dfrac{-1}{\sigma_{ij}^2} x_{sj}^2 + \dfrac{2\mu_{ij}}{\sigma_{ij}^2} x_{sj} + \dfrac{a_{ij}^2 - 2\mu_{ij} a_{ij}}{\sigma_{ij}^2}, \\ f_{ij}(x_{sj}) = 0, \textit{иначе}, \end{cases} \quad (9)$$

где $a = (\mu - \sigma)$, если $\mu - \sigma \le x \le \mu$, и $a = (\mu + \sigma)$, если $\mu \le x \le (\mu + \sigma)$; $f_{ij}(x_{sj})$ представляет собой степень принадлежности i-го правила и j-й признак; x_{sj} представляет собой s-ю выборку и j-й признак входной матрицы.

Из (1)–(9) получим

$$\frac{\partial E}{\partial \mu_{ij}} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} \left((h_{sk} - t_{sk}) \left(\frac{1 - h_{sk}}{\delta_s} \right) w_{ik} \beta_{is} \frac{2x_{sj} - 2\mu_{ij}}{-x_{sj}^2 + 2\mu_{ij} x_{sj} + \sigma_{ij}^2 - \mu_{ij}^2} \right),$$

$$\frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} \left((h_{sk} - t_{sk}) \left(\frac{1 - h_{sk}}{\delta_s} \right) w_{ik} \beta_{is} \frac{2(x_{sj} - 2\mu_{ij})^2}{\sigma_{ij}(-x_{sj}^2 + 2\mu_{ij} x_{sj} + \sigma_{ij}^2 - \mu_{ij}^2)} \right).$$

Аналогично получаются частные производные от E, относящиеся к μ_{ij} для остальных ФА.

ННС обучается методом оптимизации SCG с использованием частных производных E-отношения к приведенным выше параметрам.

3. ТЕСТИРОВАНИЕ ННК

Разработанный выше ННК с нашими функциями активации и алгоритмом SCG исследован на задаче классификации набора данных ирисы Фишера для нахождения отображения между четырьмя входными переменными (длина наружной доли околоцветника, ширина наружной, длина внутренней и ширина внутренней) и тремя классами (Setosa, Versicolor и Virginica) [11].

В наборе данных имеется 150 образцов, 75 из них используются как данные для обучения ННК, а остальные 75 – для тестирования ННК, который обучается на наборе учебных данных за 100 эпох. Затем скорректированная сеть ННК исследуется на наборе данных тестирования. Желаемые и рассчитанные выходы соответствуют всем 75 тестовым данным.

Эксперимент с ННК по классификации состояний объекта проведен на наборе данных шкалы баланса, который получен из UC Irvine Machine

Learning Repository [19] и был сгенерирован для моделирования результатов психологических экспериментов, проведенных Зиглером [12]. Примеры в наборе данных соответствуют одному из трех классов: шкала справа, шкала слева или шкала сбалансирована. Набор данных состоит из 625 примеров и пяти атрибутов: имя класса (слева, баланс, справа), левый вес (1, 2, 3, 4, 5), левое расстояние (1, 2, 3, 4, 5), правый вес (1, 2, 3, 4, 5) и правое расстояние (1, 2, 3, 4, 5). Например, элемент набора данных «2, 5, 2, 1» (левый вес = 2, левое расстояние = 5, правый вес = 2, правое расстояние = 1) следует классифицировать по классу «слева». Для обучения используем 313 образцов, а для тестирования – 312.

Результаты тестирования ННК представлены в табл. 1. Эффективность работы ННК при идентификации теста будем оценивать процентным отношением между количеством правильных результатов тестирования и общим количеством данных тестирования. Чем больше процентное отношение, тем выше эффективность работы ННК на этом тесте. Данное исследование характеризует эффективность работы ННК, т. е. эффективность классификации. Среднеквадратическая ошибка (Root Mean Square Error – RMSE) характеризует точность результатов экспериментов с ННК. Чем меньше эта ошибка, тем выше точность работы ННК на этом тесте. То есть это исследование характеризует точность классификации.

Таблица 1

Table 1

Результаты классификации набора данных ННК с различными ФА

Results of classification of NFC data set with different AFs

ФА	Эффективность ННК на тесте (%)		RMSE	
	Ирисы Фишера	Шкала баланса	Ирисы Фишера	Шкала баланса
Гауссоида	96	88.78	$2.297 \cdot 10^{-7}$	0.13
Вида *а*	96	87.82	$5.031 \cdot 10^{-6}$	0.12
Вида *б*	97.33	89.10	$6.361 \cdot 10^{-4}$	0.15
Вида *в*	97.33	77.88	0.0418	0.31
Вида *г*	96	60.25	0.041	0.61

Из табл. 1 следует, что результаты классификации с использованием предлагаемых нами ФА не превосходят результат классификации с использованием гауссовой ФА (RMSE ННК с гауссовой ФА на тесте ирисы Фишера самая малая), однако использование ННК с ФА вида *а* и *б* вполне приемлемо на разных тестах. Эффективность ННК с ФА вида *б* и *в* на тесте ирисы Фишера самая высокая.

Проведем сравнительный анализ результатов классификации ННК с предлагаемыми ФА и классификации с использованием радиальной базисной нейронной сети (РБНС), являющейся популярной альтернативой известному многослойному персептрону, поскольку имеет простую структуру и более высокую скорость обучения [20]. Также РБНС использует радиальные базис-

ные функции в качестве функций активации. В табл. 2 представлены результаты эксперимента по классификации предлагаемым ННК и РБНС для выбранных тестов ирисы Фишера и шкалы баланса.

Таблица 2

Table 2

Результаты классификации ННК и РБНС

Results of classification of NFCs and RMSE

Метод использования	Эффективность на тестах (%)	
	Ирисы Фишера	Шкала баланса
ННК	96 – 97.33	60.25 – 89.10
РБНС	65.33	54.91

Из табл. 2 следует, что предлагаемый ННК эффективнее РБНС в решаемой задаче классификации.

На рис. 3 показана динамика RMSE ННК на тесте ирисы Фишера в сравнении с учебными эпохами.

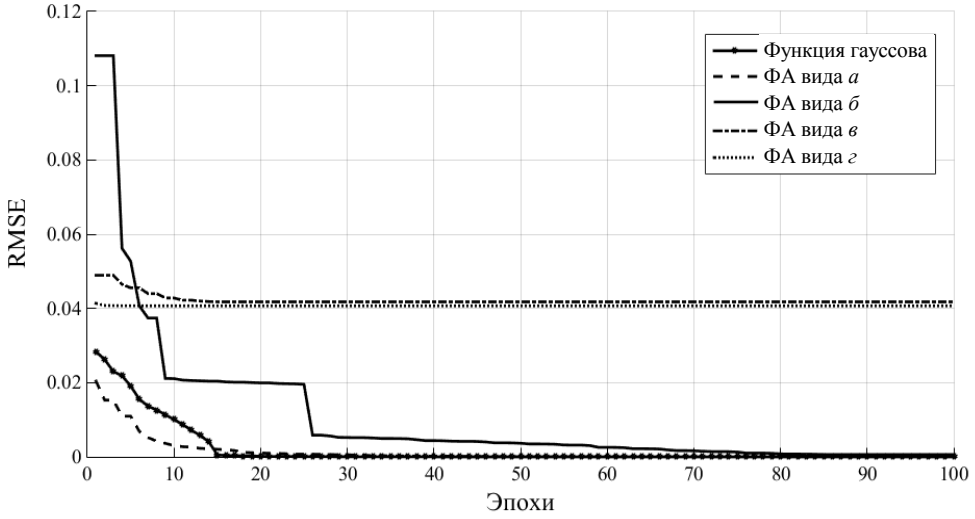


Рис. 3. RMSE ННК на тесте ирисы Фишера

Fig. 3. RMSE NFC in the Fisher's Iris test

Из рис. 3 следует, что обучение ННК с ФА *в* и *г* на основе алгоритма SVG неэффективно. RMSE (точность работы ННК с этими ФА) почти не изменяются и слишком велики, поэтому для ННК этого типа необходим поиск других методов обучения. Относительно обучения ННК с ФА *а* и *б* на основе алгоритма SVG следует сделать более оптимистичный вывод и утверждать, что ННК данных типов эффективно решают задачи классификации объектов и их состояний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена разработка и исследование ННК, использующих четыре вида нечетких ФА, для решения задач классификации биологических объектов и их состояний. Для обучения ННК применен алгоритм масштабированного сопряженного градиента (SCG). Тестирование разработанных ННК на наборах данных ирисы Фишера и шкалы баланса, их сравнительный анализ с известным ННК с гауссовой ФА и РБНС показали конкурентоспособность двух из четырех разработанных ННК по эффективности и точности классификации. Для двух неконкурентоспособных ННК необходим поиск других методов обучения и, в частности, возможно применение метода Нелдера–Мида [21], который успешно зарекомендовал себя при обучении НС, входящей в структуру системы автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галушкин А.И.* Нейронные сети: основы теории. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 496 с.

2. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.

3. *Кориков А.М., Павлов С.Н.* Теория систем и системный анализ: учебное пособие. – М.: Инфра-М, 2014. – 288 с.

4. *Рыбина Г.В.* Основы построения интеллектуальных систем: учебное пособие. – М.: Финансы и статистика: Инфра-М, 2010. – 432 с.

5. *Браверман Э.М., Мучник И.Б.* Структурные методы обработки эмпирических данных. – М.: Наука, 1983. – 464 с.

6. *Nguyen A.T., Korikov A.M.* Models of neural networks with fuzzy activation functions [Electronic resource] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177. – URL: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012031 (accessed: 13.09.2018).

7. *Nguyen A.T., Korikov A.M.* Neural network model with fuzzy activation functions for time series predictions // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 50–52.

8. *Moller M.F.* A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning // Neural Networks. – 1993. – Vol. 6, N 4. – P. 525–533.

9. *Jang J.S.R., Sun C.T., Mizutani E.* Neuro-fuzzy and soft computing. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997. – P. 110–123.

10. *Ata R., Kocyigit Y.* An adaptive neuro-fuzzy inference system approach for prediction of tip speed ratio in wind turbines // Expert Systems with Applications. – 2010. – Vol. 37, N 7. – P. 5454–5460.

11. *Fisher R.A.* The use of multiple measurements in taxonomic problems // Annals of Eugenics. – 1936. – Vol. 7. – P. 179–188.

12. *Siegler R.S.* Three aspects of cognitive development // Cognitive Psychology. – 1976. – Vol. 8, N 4. – P. 481–520.

13. *Attaway S.* MATLAB: a practical introduction to programming and problem solving. – 3rd ed. – Burlington, MA: Elsevier, 2013. – 539 p.

14. *Chakraborty D., Pal N.R.* A neuro-fuzzy scheme for simultaneous feature selection and fuzzy rule-based classification // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2004. – Vol. 15, N 1. – P. 110–123.

15. *Sun C.T., Jang J.S.*A neuro-fuzzy classifier and its applications // Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy System. – San Francisco, 1993. – P. 94–98.

16. Методы решения задачи минимизации квадратичной функции. Проблемы сходимости: методические указания / сост. К.В. Григорьева; С.-Петерб. гос. архит.-строит. ун-т. – СПб., 2009. – 36 с.

17. *Abe S.* Support vector machines for pattern classification. – NewYork, NY: Springer, 2010. – 473 p.

18. *Senning J.R.* Computing and estimating the rate of convergence [Electronic resource] / Gordon College, Department of Mathematics and Computer Science. – URL: http://www.math-cs.gordon.edu/courses/ma342/handouts/rate.pdf (accessed: 13.09.2018).

19. *Siegler R.S.* Balance scale weight & distance database [Electronic resource] // UCI Machine Learning Repository. – URL: http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/balance+scale (accessed: 13.09.2018).

20. Using radial basis function networks for function approximation and classification / Y. Wu, H. Wang, B. Zhang, K.L. Du // ISRN Applied Mathematics. – 2012. – Vol. 2012. – Art. 324194. – 34 p.

21. *Игумнов И.В., Куцый Н.Н.* Метод Нелдера – Мида в обучении искусственной нейронной сети, входящей в состав ШИМ-элемента // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 3. – С. 22–30.

Кориков Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик МАН ВШ и МАИ, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ). Основное направление научных исследований – автоматизация и оптимизация систем обработки информации и управления. Имеет более 300 научных публикаций, в том числе 10 монографий. E-mail: korikov@asu.tusur.ru

Нгуен Ань Ту, аспирант отделения автоматизации и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ). Основное направление научных исследований – нейронные нечеткие сети. Имеет 10 научных публикаций. E-mail: nguyenanhtu@tpu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-73-86

A neuro-fuzzy classification of objects and their states[*]

A.M. KORIKOV[1,2,a], *A.T. NGUYEN*[2,b]

[1] *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation*

[2] *Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Av. Tomsk, 634050, Russian Federation*

[a] *korikov@asu.tusur.ru* [b] *nguyenanhtu@tpu.ru*

Abstract

In this paper, we present the development and some investigation results of a neural fuzzy network (NFN) to solve classification problems of biological objects and their states. A general approach to the problem of automatic classification of objects is studied. In this work, we use a Fisher's Iris data set for the object classification problem, and the assessment of the emotional state of objects is given on the data set of the balance scale. The NFN is a combination of fuzzy inference systems and a neural network. The structure of the NFN takes the form of a multilayer unidirectional network consisting of an input layer, a fuzzy activation function (AF) layer, a fuzzification layer, a defuzzification layer, a normalization layer and an output layer. In the fuzzy AF layer, we use fuzzy AFs that were developed and investigated in our previous studies. Herein, four fuzzy AFs corresponding to four types of NFN are investigated. The training process of the NFN is conducted by the use of the K-mean cluster method to determine

[*] *Received 18 April 2018.*

antecedent network parameters. During the training process, a scaled conjugate gradient (SCG) algorithm is used to reduce the computational effort of every learning iteration, and therefore, enhance the learning speed. The testing process is carried out with Fisher's Iris data sets and the balance scale. These data sets are classical and often used to illustrate the performance of various statistical classification algorithms. The results obtained by various types of fuzzy AF have confirmed the validity of the current NFN to solve classification problems. A comparative analysis of the current four NFN types and the NFN using the Gaussian AF from a previous paper in terms of efficiency and accuracy is performed in this work.

Keywords: neural fuzzy network, classification, fuzzy activation function, scaled conjugate gradient algorithm, Iris Fisher, scales balance, classification efficiency, classification accuracy

REFERENCES

1. Galushkin A.I. *Neironnye seti: osnovy teorii* [Neural networks: basic theory]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2010. 499 p.

2. Russel S.J., Norvig P. *Artificial intelligence: a modern approach*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall/Pearson Education, 2003 (Russ. ed.: Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyi intellekt: sovremennyi podkhod*. Moscow, Williams Publ., 2006. 1408 p.).

3. Korikov A.M., Pavlov S.N. *Teoriya sistem i sistemnyi analiz* [Theory of systems and systems analysis]. Moscow, Infra-M Publ., 2014. 288 p.

4. Rybina G.V. *Osnovy postroeniya intellektual'nykh sistem* [Fundamentals of building intelligent systems]. Moscow, Finansy i statistika Publ., Infra-M Publ., 2010. 432 p.

5. Braverman E.M., Muchnik I.B. *Strukturnye metody obrabotki empiricheskikh dannykh* [Structural methods for processing empirical data]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 464 p.

6. Nguyen A.T., Korikov A.M. Models of neural networks with fuzzy activation functions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177. Available at: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012031 (accessed 13.09.2018).

7. Nguyen A.T., Korikov A.M. Neural network model with fuzzy activation functions for time series predictions. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of TUSUR*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 50–52.

8. Moller M.F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. *Neural Networks*, 1993, vol. 6, no. 4, pp. 525–533.

9. Jang J.S.R., Sun C.T., Mizutani E. *Neuro-fuzzy and soft computing*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1997, pp. 110–123.

10. Ata R., Kocyigit Y. An adaptive neuro-fuzzy inference system approach for prediction of tip speed ratio in wind turbines. *Expert Systems with Applications*, 2010, vol. 37, no. 7, pp. 5454–5460.

11. Fisher R.A. The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of Eugenics*, 1936, vol. 7, pp. 179–188.

12. Siegler R.S. Three aspects of cognitive development. *Cognitive Psychology*, 1976, vol. 8, no. 4, pp. 481–520.

13. Attaway S. *MATLAB: a practical introduction to programming and problem solving*. 3rd ed. Burlington, MA, Elsevier, 2013. 539 p.

14. Chakraborty D., Pal N.R. A neuro-fuzzy scheme for simultaneous feature selection and fuzzy rule-based classification. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2004, vol. 15, no. 1, pp. 110–123.

15. Sun C.T., Jang J.S. A neuro-fuzzy classifier and its applications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy System*. San Francisco, 1993, pp. 94–98.

16. Grigor'eva K.V., comp. *Metody resheniya zadachi minimizatsii kvadratichnoi funktsii. Problemy skhodimosti* [Methods for solving the problem of minimizing a quadratic function. Convergence problems]. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. St. Petersburg, 2009. 36 p.

17. Abe S. *Support vector machines for pattern classification*. NewYork, NY, Springer, 2010. 473 p.

18. Senning J.R. *Computing and estimating the rate of convergence*. Gordon College, Department of Mathematics and Computer Science. Available at: http://www.math-cs.gordon.edu/courses/ma342/handouts/rate.pdf (accessed 13.09.2018).

19. Siegler R.S. Balance scale weight & distance database. *UCI Machine Learning Repository*. Available at: http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/balance+scale (accessed 13.09.2018).

20. Wu Y., Wang H., Zhang B., Du K.L. Using radial basis function networks for function approximation and classification. *ISRN Applied Mathematics*, 2012, vol. 2012, art. 324194. 34 p.

21. Igumnov I.V., Kutsyi N.N. Metod Neldera – Mida v obuchenii iskusstvennoi neironnoi seti, vkhodyashchei v sostav ShIM-elementa [The Nelder–Mead method in learning an artificial neural network as a part of the PWM element]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 3 (68), pp. 22–30.

Для цитирования:

Кориков А.М., Нгуен А.Т. Нейро-нечеткая классификация объектов и их состояний // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 73–86. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-73-86.

For citation:

Korikov A.M., Nguyen A.T. Neiro-nechetkaya klassifikatsiya ob"ektov i ikh sostoyanii [A neuro-fuzzy classification of objects and their states]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 73–86. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-73-86.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 87–106

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 87–106

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 519.854.3

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-87-106

Эффективный параметрический алгоритм оптимизации расписаний параллельных систем с заданным расписанием начала обслуживания*

Ю.А. МЕЗЕНЦЕВ[a], И.В. ЭСТРАЙХ[b]

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

[a] *mesyan@yandex.ru, mezencev@corp.nstu.ru* [b] *estrajx@corp.nstu.ru*

В статье предложен параметрический полиномиально трудоемкий алгоритм оптимизации расписаний параллельной системы с задержками на входе, который дополнен улучшающим обменным алгоритмом. Критерием эффективности в рассматриваемой постановке является максимальное быстродействие системы ($C_{\max}$), что обеспечивает равномерную загрузку приборов. Наличие этого критерия, а также задержек начала обслуживания поступающих заявок делает задачу труднорешаемой с априорной оценкой любого аппроксимационного алгоритма, равной двум. Предложенный параметрический алгоритм основан на схеме динамического программирования модифицированной адаптивным сужением области поиска, что обеспечивает его вычислительную эффективность. Сформулированные задачи синтеза и предложенный алгоритм оптимизации расписаний параллельных обслуживающих систем ориентированы на практическое применение в календарном планировании и оперативном регулировании производственных процессов с дискретным характером. Оценена трудоемкость синтеза точных и приближенных к оптимальным по быстродействию расписаниям. Приведен иллюстративный пример использования представленных формальных постановок и алгоритма для синтеза оптимальных расписаний параллельной системы рассматриваемого типа. Проведенные вычислительные эксперименты на специально сгенерированных реализациях задачи больших размерностей показали хорошие практические результаты. Приведена итоговая сравнительная статистика точности и времени счета посредством программных реализаций параметрического и обменного алгоритмов с результатами альтернативных инструментов, показывающая неоспоримое преимущество представленных в статье алгоритмов. Экспериментально доказана вычислительная эффективность связки алгоритма, основанного на процедуре динамического программирования с отсевом части вариантов на каждом шаге и обменного алгоритма, что позволяет обеспечить приемлемое быстродействие и близость к оптимумам. Апостериорная оценка близости к оптимумам получаемых решений на доступных для оценки тестах не превысила 5 %.

Ключевые слова: оптимальное расписание, параллельные производственные системы, несвязанные параллельные системы, задержки начала обслуживания, критерий быстродействия, дискретная оптимизация, эффективный параметрический алгоритм, обменный улучшающий алгоритм

---

* *Статья получена 30 марта 2018 г.*

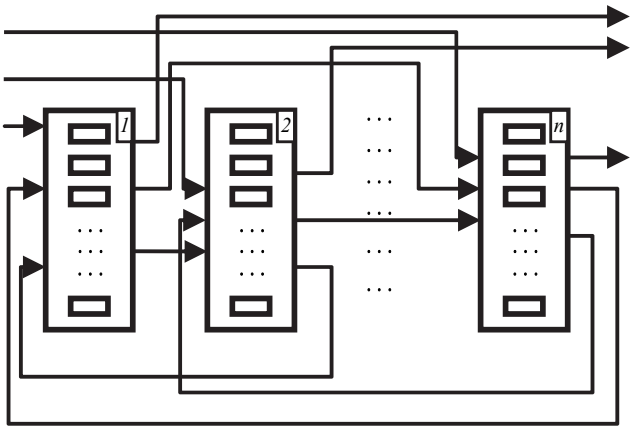
ВВЕДЕНИЕ

Наиболее общей и актуальной задачей теории расписаний применительно к производственным системам является задача синтеза расписаний параллельно-последовательных обслуживающих систем. Общую постановку такой задачи, связанных с ней подзадач и описание некоторых алгоритмов решения можно найти в работах [1–13]. Целью настоящей статьи является описание логического завершения работы над важнейшими компонентами инструментария синтеза оптимальных по быстродействию расписаний общей задачи [4]. Таковыми являются эффективные алгоритмы оптимизации расписаний параллельной системы с задержками начала обслуживания. Для пояснения связи между одностадийной параллельной системой с заданным расписанием поступления заявок и многостадийной параллельно-последовательной системой рассмотрим графическое изображение примера последней (рисунок) [5].

Типичная параллельно-последовательная система состоит из совокупности блоков, или подсистем, содержащих взаимозаменяемые в общем случае неидентичные приборы. На производстве это группы взаимозаменяемого оборудования. На рисунке они пронумерованы от 1 до n. Будем считать заданными технологические последовательности обслуживания без прерываний всех заявок с точностью до группы оборудования (блока, подсистемы). Технологические маршруты фиксированы, но различны для различных заявок. Известным (детерминированным) также считается время обслуживания каждой заявки каждым прибором из каждого блока и расписание на входе системы.

Задача в данном случае заключается в том, чтобы определить расписание работы системы (всех блоков и приборов), оптимальное по какому-либо критерию качества.

К настоящему времени общая задача синтеза оптимальных расписаний параллельно-последовательных ОС весьма далека от приемлемого решения при сколько-нибудь реальной размерности реализаций. Один из возможных подходов к решению задачи синтеза оптимальных расписаний параллельно-последовательных систем заключается в декомпозиции общей задачи и выделении локальных подзадач по числу блоков параллельных приборов и координирующей задачи [4]. Каждая локальная подзадача на некотором этапе определяет расписание параллельной подсистемы соответствующего блока.



Параллельно-последовательные обслуживающие системы

Parallel-sequential service systems

Можно показать, что если в каждый момент времени известны расписания всех блоков параллельных подсистем, то последовательными приближениями (решая по этапам координирующую задачу) можно определить оптимальное расписание всей параллельно-последовательной системы. Поэтому синтез оптимальных расписаний параллельных систем, по сути, является ключевой подзадачей общей задачи теории расписаний для параллельно-последовательных систем.

1. ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ЗАДЕРЖКАМИ НАЧАЛА ОБСЛУЖИВАНИЯ ЗАЯВОК

Пусть имеется ряд заявок, которые необходимо распределить между параллельными приборами при известной (различной) производительности таким образом, чтобы минимизировать суммарное время обслуживания всех заявок (минимизировать время окончания работы всей ОС, минимизировать суммарные затраты либо максимизировать некоторый показатель качества обслуживания заявок). Прерывания обслуживания запрещены. Пусть также известно расписание поступления заявок в параллельную обслуживающую систему. В этом случае необходимо учитывать величины задержек поступления заявок. Обозначим задержку поступления j-й заявки в ОС через τ_j^0 и упорядочим заявки по возрастанию τ_j^0 (тогда $T^0 = \left\| \tau_j^0 \right\|$ – расписание на входе системы). Здесь и далее $\|\cdot\|$ обозначает вектор, матрицу или тензор, соответствующей контексту размерности. Через $x_{i,j}$ обозначены булевы переменные назначения заявки j на прибор i, через $t_{i,j}$ – время обслуживания заявки j прибором i $\left(T = \left\| t_{i,j} \right\|\right)$, а также пусть $T^1 = \left\| \tau_j^1 \right\|$ – расписание на выходе системы.

Один из вариантов общей математической модели, позволяющей синтезировать расписания параллельной системы с задержками на входе, представляется следующим образом [5]:

$$\sum_{i=1}^{I} x_{i,j} = 1, \quad j = \overline{1,J}; \tag{1}$$

$$\underline{b_i} \le \sum_{j=1}^{J} x_{i,j} \le \overline{b_i}, \quad i = \overline{1,I}; \tag{2}$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если заявка } j \text{ назначается на прибор } i, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases} \tag{3}$$

$$y_{i,j} \ge 0, \; i = \overline{1,I}, \; j = \overline{1,J}; \tag{4}$$

$$\tau_{i,j} = \tau_j^0 - \sum_{l=1}^{j-1} (\tau_{i,l} + t_{i,l}) x_{i,l}\,,\ i = \overline{1,I}\,,\ j = \overline{1,J}\,; \tag{5}$$

$$\hat{\tau}_{i,j} = \tau_{i,j} + y_{i,j} \ge 0\,,\ i = \overline{1,I}\,,\ j = \overline{1,J}\,; \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{J} \hat{\tau}_{i,j} x_{i,j} + \sum_{j=1}^{J} t_{i,j} x_{i,j} \le \lambda\,,\ \ i = \overline{1,I}\,, \tag{7}$$

где $x_{i,j}$ – переменные-назначения, подлежащие определению; $\hat{\tau}_{i,j}$ имеют смысл фактических задержек начала выполнения j-й заявки i-м прибором после завершения обслуживания им предшествующей заявки. Компенсирующие переменные $y_{i,j}$ вводятся для того, чтобы избежать появления отрицательных задержек $\tau_{i,j}$. Действительно, наличие неравенств (4) и (6) гарантирует выполнение условий:

$$\hat{\tau}_{i,j} = \begin{cases} \tau_{i,j}, & \text{если } \tau_{i,j} \ge 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Условия (1)–(3) характерны для задачи о назначениях, (1) – обеспечивают назначения любой заявки только на один прибор; (2) – назначения не менее $\underline{b_i}$ и не более $\overline{b_i}$ заявок на любой прибор i; (5) и (6) вычисляют фактические задержки обслуживания j-й заявки i-м прибором после окончания обслуживания им предшествующей заявки.

Если для модели (1)–(7) задан критерий качества (или эффективности) расписания, например

$$\lambda \to \min\,, \tag{8}$$

то (1)–(8) определяют задачу синтеза оптимальных по быстродействию расписаний параллельной системы с задержками на входе, (7) и (8) реализуют минимаксный критерий, имеющий смысл критерия максимального быстродействия (иногда называемого также критерием равномерной загрузки) вида $\max\limits_i \left\{ \sum\limits_{j=1}^{J} (t_{i,j} + \hat{\tau}_{i,j}) x_{i,j} \right\} \to \min$.

Расписание, синтезируемое посредством решения задачи (1)–(8), полностью определяется оптимальными назначениями $x_{i,j}^*$, $i = \overline{1,I}$, $j = \overline{1,J}$ и фактическими задержками при таких назначениях $\hat{\tau}_{i,j}^*$, $i = \overline{1,I}$, $j = \overline{1,J}$.

Расписание на выходе системы: $\tau_j^1 = \sum\limits_{i=1}^{I} (\hat{\tau}_{i,j} + t_{i,j}) x_{i,j}$, $j = \overline{1,J}$.

То же при оптимальном решении: $\tau_j^{1*} = \sum\limits_{i=1}^{I} \left(\hat{\tau}_{i,j}^* + t_{i,j} \right) x_{i,j}^*$, $j = \overline{1,J}$.

Ориентируясь на системы данного вида, отметим основные трудности, возникающие при решении задачи (1)–(8). Прежде всего это наличие булевых переменных, рекурсивных функций и ранцевых ограничений, определяющих принадлежность представленной задачи к классу NP-полных.

2. ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ЗАДЕРЖКАМИ НАЧАЛА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Один из подходов к решению задачи (1)–(8) заключается в приведении к ее нормальному виду задачи математического программирования с последующим прямым решением редуцированной задачи. Такая редукция обусловлена тем, что выражения (5)–(8) содержат рекурсивные функции фактических задержек $\tau_{i,j}$. В явном виде $\tau_{i,j}$, как рекурсивные функции относительно переменных $x_{i,j}$, определяет (5). Раскрытие рекурсий и дальнейшая линеаризация задачи (1)–(8), приводит к задаче смешанного линейного программирования следующего вида [5]:

$$\sum_{i=1}^{I} x_{i,j} = 1, \; j = \overline{1,J}; \tag{9}$$

$$\underline{b_i} \le \sum_{j=1}^{J} x_{i,j} \le \overline{b_i}, \; i = \overline{1,I}, \tag{10}$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{ если заявка } j \text{ закрепляется за прибором } i, \\ 0 \text{ в противном случае;} \end{cases} \quad i = \overline{1,I}, \; j = \overline{1,J} \tag{11}$$

$$u_{i,j,k} = \begin{cases} 1 \text{ при истинности } x_{i,j} x_{i,k} \bigcap_{l=k+1}^{j-1} \bar{x}_{i,l}, \\ 0 \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad i = \overline{1,I}, \; j = \overline{1,J}, \; k = \overline{1,J} \tag{12}$$

$$\begin{gathered} -K + 2 \le x_{i,j} + x_{i,k} - \sum_{l=k+1}^{j-1} x_{i,l} - K u_{i,j,k} \le 1, \\ i = \overline{1,I}, \; j = \overline{1,J}, \; k = \overline{1,J}, \; K = j - k + 1, \end{gathered} \tag{13}$$

$$\hat{\tau}_{i,j} = y_{i,j} + \tau_j^0 - \sum_{k=1}^{j-1} (\tau_k^0 + t_{i,k}) \, u_{i,j,k} \ge 0,$$

или

$$-y_{i,j} + \sum_{k=1}^{j-1} (\tau_k^0 + t_{i,k}) u_{i,j,k} \le \tau_j^0, \; i = \overline{1,I}, \; j = \overline{1,J}, \tag{14}$$

$$\sum_{j=1}^{J}(\tau_j^0 + t_{i,j})x_{i,j} + \sum_{j=1}^{J} y_{i,j} - \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{j-1}(\tau_k^0 + t_{i,k})\, u_{i,j,k} \le \lambda\,,\ i=\overline{1,I}\,, \qquad (15)$$

$$y_{i,j} \ge 0\,,\ i=\overline{1,I}\,,\ j=\overline{1,J}\,, \qquad (16)$$

$$\lambda \to \min\,, \qquad (17)$$

где $K = j - k + 1$.

Несмотря на формальную разрешимость редуцированной относительно (1)–(8) задачи (9)–(17), данный подход можно считать лишь начальным этапом общего решения. Очевидно, что число булевых переменных в редуцированной задаче, как и число ограничений, увеличивается примерно в $J/2$ раза по сравнению с (1)–(8). Тем самым формальная сложность (1)–(8) редуцируется в вычислительную сложность (9)–(17).

Другой возможный подход заключается в упрощении условий исходной задачи (1)–(8), а именно: вместо условий, содержащих рекурсивные функции (4)–(7), вводятся два минимаксных критерия, реализуемых следующим образом:

$$\sum_{j=1}^{J}\tau_j^0 x_{i,j} \le \beta\,,\ \ i=\overline{1,I}\,, \qquad (18)$$

$$\sum_{j=1}^{J} t_{i,j} x_{i,j} \le \lambda\,,\ \ i=\overline{1,I}\,, \qquad (19)$$

$$\lambda \to \min\,, \qquad (20)$$

$$\beta \to \min\,. \qquad (21)$$

Из контекста понятно, что второй подход к распределению заявок между приборами предполагает компромиссное решение по «чистому» быстродействию ОС без учета задержек и по равномерности распределения задержек между приборами. Далее определяется Парето-оптимальное решение (1)–(3) и (18)–(21), все компоненты которого, как показано в [2], допустимы для (1)–(8) и (9)–(17)) и из которого выделяется расписание, наилучшее для (1)–(8). Благодаря этому удается исключить из рассмотрения большую часть вариантов и обеспечить приемлемые трудоемкость и точность для ряда практических реализаций задачи [4].

Численные эксперименты с обеими моделями подтверждают эффективность второго подхода, так как при использовании (1)–(3) и (18)–(21) для большинства примеров наблюдается падение быстродействия синтезируемых расписаний не более чем на 5 % от оптимального уровня, что для многих реальных объектов вполне приемлемо.

Развитие данного подхода привело к использованию декомпозиции задач (9)–(17), (1)–(3) и (18)–(21) и применению общей схемы динамического программирования (ДП) с отсевом части вариантов [4]. Это позволяет гаран-

тированно улучшить оценки точности решения, что, однако, связано с потерей скорости поиска решения.

Наконец, применение метода ДП непосредственно к исходной постановке (1)–(8) позволяет создать еще один алгоритм, обеспечивающий компромисс между трудоемкостью вычислений и точностью решения. Рассмотрим этот подход более подробно.

3. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ С ОТСЕВОМ ВАРИАНТОВ В ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ЗАДЕРЖКАМИ ПОСТУПЛЕНИЯ ЗАЯВОК

Из-за наличия рекурсий ДП едва ли не единственный вычислительный метод, применимый непосредственно для решения задачи (1)–(8). Однако его прямое применение неэффективно из-за NP – полноты задачи. При попытке точного решения (1)–(8) ДП приводит к полному перебору всех допустимых вариантов. Нетрудно подсчитать число таких вариантов N. Например, если s – номер этапа и в (2) положить $\underline{b}_i = 0$ и $\overline{b}_i = J$, то $N = (J^{I+1} - J)/2$. По этой причине метод ДП в задаче (1)–(8) имеет трудоемкость, превышающую экспоненциальную, и в «чистом» виде на реальных размерностях неприменим.

Для построения эффективного приближенного алгоритма воспользуемся общей схемой ДП, производя отсев локально наихудших вариантов на ряде шагов (этапов) динамического программирования.

Как и выше, будем считать упорядоченными все заявки $j = \overline{1,J}$ по величинам исходных задержек $\left(\text{входному расписанию } \left\|\tau_j^0\right\|\right)$. Тогда в соответствии с процедурой ДП определим номера этапов $s = \overline{1,J}$. Обозначим через $f_{i,s}\left(\tau_s^0,\ t_{i,s},\ x_{i,s}\right)$, $i = \overline{1,I}$, время завершения обслуживания прибором i заявки s на этапе s, а через $\varphi_s\left(\tau_j^0,\ t_{i,j},\ x_{i,j}\right)$ $i = \overline{1,I}$, $j = \overline{1,s}$, – условно минимальное время завершения обслуживания всех принятых заявок на этапах с первого по s-й.

$$f_{i,s}\left(\tau_s^0,\ t_{i,s},\ x_{i,s}\right) = \max\left\{0, \left[\tau_s^0 x_{i,s} - \varphi_{i,s-1}\left(\tau_{s-1}^0,\ t_{i,j},\ x_{i,j}\right)\right]\right\} + t_{i,s} x_{i,s},$$
$$i = \overline{1,I}, \quad j = \overline{1,s-1}. \tag{22}$$

Рекуррентное соотношение Беллмана для этой задачи:

$$\varphi_{i,s}\left(\tau_j^0,\ t_{i,j},\ x_{i,j}\right) = \left\{f_{i,s}\left(\tau_s^0,\ t_{i,s},\ x_{i,s}\right) + \varphi_{i,s-1}\left(\tau_j^0,\ t_{i,j},\ x_{i,j}\right)\right\},\ j = \overline{1,s-1}, \tag{23}$$

$$\varphi_s\left(\tau_j^0,\ t_{i,j},\ x_{i,j}\right) = \max_i\left\{\varphi_{i,s}\left(\tau_s^0,\ t_{i,j},\ x_{i,j}\right)\right\},\ j = \overline{1,s},\ i = \overline{1,I}. \tag{24}$$

Для достижения максимального быстродействия по критерию (7)–(8) на последнем шаге следует выбрать минимальное значение $\varphi_{\bar{I}}(\hat{\tau}_{\bar{I},j},\ t_{i,j},\ x_{i,j})$, т. е. найти $\lambda = \min\{\varphi_{\bar{I}}(\hat{\tau}_{\bar{I},j},\ t_{i,j},\ x_{i,j})\}$.

Отсев части промежуточных расписаний на этапах ДП возможен в различных вариациях. Если отбрасывать все варианты расписания на шаге s, кроме локально наилучшего, то такой способ построения расписания совпадет с жадным алгоритмом. Если оставлять все промежуточные расписания, это приведет к полному перебору вариантов. При этом на первом этапе будем иметь J, на втором этапе – J^2, на этапе k – J^k вариантов промежуточного расписания. Если же пытаться найти компромисс между точностью и быстродействием, то с учетом стремления построить эффективный алгоритм число промежуточных расписаний должно полиномиально зависеть от количества булевых переменных задачи (1)–(8).

Рассмотрим одну из таких компромиссных вариаций. Определим максимально возможное число вариантов K, оставляемое на этапе k для дальнейшего анализа. Для удобства изложения примем в качестве K некоторую константу. Например, положим $K = 1024$ и определим максимальное число $K' = J^k \le K$. Поскольку на каждом этапе ДП число вариантов промежуточных расписаний увеличивается в J раз, проведем отсев J^{k-1} доли локально наихудших из генерируемых вариантов на всяком этапе, начиная с $k+1$-го. Вполне очевидно значение k: $k = \left[\dfrac{\ln(K)}{\ln(J)}\right]$, где $[\cdot]$ – целая часть числа. Тогда общее число промежуточных расписаний N' составит

$$N' = J + J^2 + \ldots + J^{k-1} + J^k + \ldots + J^k = (J^{k-1} - J)/2 + (I - k + 1)J^k. \qquad (25)$$

Поскольку k – некоторая задаваемая константа (параметр алгоритма), то (25) отображает полиномиальную зависимость трудоемкости ДП с отсевом вариантов от размерности задачи (1)–(8). Для наглядности сравним N с N', положив значение параметра $k = 3$, а также $I = 1000$, $J = 100$. Тогда $N = (100^{1001} - 100)/2$, $N' = (100^2 - 100)/2 + (1000 - 2)100^3 = 998\ 004\ 950$. Данные обстоятельства опосредуют вполне заурядную трудоемкость параметрического алгоритма, которая кратна N', и фактически бесконечную трудоемкость ДП, кратную N. Опишем параметрический алгоритм ДП с отсевом вариантов.

АЛГОРИТМ A_P

1. Ввод исходных данных $\left(\tau_i^0,\ t_{i,j}\right)$, $j = \overline{1,J}$, $i = \overline{1,I}$, и параметров k, K'. Положим $\varphi_{i,0}\left(\tau_0^0,\ t_{i,j},\ x_{i,j}\right) \equiv 0$, определим начальный номер шага $\eta := 0$.

2. $\eta := \eta + 1$.

3. Проверка номера этапа. Если $\eta > I$, то переход к этапу 7, если нет – следующий пункт.

4. На этапе η в соответствии с (22)–(24) генерируем все допустимые варианты расписания, вычисляем $f_{\eta,j}(\tilde{\tau}_{\eta,j}, t_{\eta,j}, x_{\eta,j})$ и длины расписаний $\varphi_{\eta,j}(\tilde{\tau}_{\eta,j}, t_{i,j}, x_{i,j})$.

5. Проверка N^{η} – числа вариантов $\varphi_{\eta,j}(\tilde{\tau}_{\eta,j}, t_{i,j}, x_{i,j})$ на этапе η. Если $\eta < k$, т. е. $N^{\eta} \le N'$, то переход к п. 2. В противном случае следующий пункт.

6. Отсев J^{k-1} из всех порожденных в п. 4 вариантов с наибольшими значениями длины расписания $\varphi_{\eta,j}(\tilde{\tau}_{\eta,j}, t_{i,j}, x_{i,j})$. Переход к п. 2.

7. Выбор вариантов кратчайших расписаний. Составление расписаний обратным ходом ДП.

Проиллюстрируем работу алгоритма A_P небольшим числовым примером синтеза расписаний параллельной системы.

4. ЧИСЛОВОЙ ПРИМЕР СИНТЕЗА РАСПИСАНИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В параллельную обслуживающую систему, состоящую из двух неидентичных приборов, неодновременно поступает семь заявок. Данные о нормах времени обслуживания и задержках поступления заявок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Исходные данные

Initial data

Номер заявки (j)	Время обслуживания ($t_{i,j}$) (номер прибора (i))		Задержка поступления заявки $\left(\tau_j^0\right)$
	1	2	
1	2	4	0
2	3	2	0
3	5	4	2
4	2	4	3
5	4	2	4
6	3	3	5
7	4	3	6

Применение алгоритма A_P динамического программирования с отсевом вариантов для решения данного примера отображено ниже в последовательности табл. 2–8, каждая из которых соответствует этапу ДП. Положим $k = 3$, $K' = 8$.

Таблица 2

Table 2

Результаты первого этапа

Results of the first stage

Этап 1	$x_{1,1}$	$x_{2,1}$	$f_{i,1}$	$\phi_{i,1} = f_{i,1}$, $\phi_1 = \max\limits_i \{\phi_{i,1}\}$
Заявка 1	1	0	(2, 0)	$\phi_1 = \max\{2,0\} = 2$
	0	1	(0, 4)	$\phi_1 = \max\{0,4\} = 4$

Таблица 3

Table 3

Результаты второго этапа

Results of the second stage

Этап 2	$x_{1,1}$	$x_{2,1}$	$x_{1,2}$	$x_{2,2}$	$f_{i,2}$	$\phi_{i,2} = \{f_{i,2} + \phi_{i,1}\}$, $\phi_2 = \max\limits_i \{\phi_{i,2}\}$
Заявка 1 + + Заявка 2	1	0	1	0	(3, 0)	$\phi_2 = \max\{2+3;\ 0+0\}=5$
	1	0	0	1	(0, 2)	$\phi_2 = \max\{2+0;\ 0+2\}=2$
	0	1	1	0	(3, 0)	$\phi_2 = \max\{0+3;\ 4+0\}=4$
	0	1	0	1	(0, 2)	$\phi_2 = \max\{0+0;\ 4+2\}=6$

Таблица 4

Table 4

Результаты третьего этапа и отсев вариантов

Results of the third stage and sifting of options

Этап 3	$x_{1,1}$	$x_{2,1}$	$x_{1,2}$	$x_{2,2}$	$x_{1,3}$	$x_{2,3}$	$f_{i,3}$	$\phi_{i,3} = \{f_{i,3} + \phi_{i,2}\}$, $\phi_3 = \max\limits_i \{\phi_{i,3}\}$
Заявка 1 + + Заявка 2 + + Заявка 3	1	0	1	0	1	0	(5, 0)	$\phi_3 = \max\{2+3+5;\ 0+0+0\}=10$
	1	0	0	1	0	1	(0, 4)	$\phi_3 = \max\{2+0+0;\ 0+2+4\}=6$
	1	0	1	0	0	1	(0,4+2)	$\phi_3 = \max\{3+2+0;\ 0+0+4+2\}=6$
	1	0	0	1	1	0	(5, 0)	$\phi_3 = \max\{2+0+5;\ 0+2+0\}=7$
	0	1	1	0	1	0	(5, 0)	$\phi_3 = \max\{0+3+5;\ 4+0+0\}=8$
	0	1	0	1	0	1	(0, 4)	$\phi_3 = \max\{0+0+0;\ 2+4+4\}=10$
	0	1	1	0	0	1	(0, 4)	$\phi_3 = \max\{0+3+0;\ 4+0+4\}=8$
	0	1	0	1	1	0	(5+2,0)	$\phi_3 = \max\{0+0+5+2;\ 2+4+0\}=7$

Заливкой в табл. 4 выделены строки (и варианты назначений), имеющие локально наилучшие промежуточные оценки длины расписания для третьего этапа. Все прочие строки (и варианты назначений) из дальнейшего рассмот-

рения исключены. Тем самым вдвое сокращено число допустимых вариантов на данном этапе и всех последующих этапах.

Заливкой в табл. 5 и 6 выделены строки (и варианты назначений), имеющие локально наилучшие промежуточные оценки длины расписания для соответствующих этапов.

Таблица 5

Table 5

Результаты четвертого этапа и отсев вариантов

Results of the fourth stage and sifting of options

Этап 4	$x_{1,2}$	$x_{2,2}$	$x_{1,3}$	$x_{2,3}$	$x_{1,4}$	$x_{2,4}$	$f_{i,4}$	$\phi_{i,4} = \{f_{i,4} + \phi_{i,3}\}$, $\phi_4 = \max_i \{\phi_{i,4}\}$
Заявка 1 + + Заявка 2 + + Заявка 3 + + Заявка 4	0	1	0	1	0	1	(0,4)	max{2+0+0+0; 0+2+4+4}=10
	1	0	0	1	0	1	(0,4)	max{2+3+0+0; 0+0+6+2+4}=12
	0	1	1	0	0	1	(0,1+4)	max{2+0+5+0; 0+2+0+5}=7
	0	1	1	0	0	1	(0,4)	max{0+0+7+0; 2+4+0+4}=10
	0	1	0	1	1	0	(1+2,0)	max{2+0+0+3; 0+2+4+0}=6
	1	0	0	1	1	0	(2,0)	max{2+3+0+2; 0+0+6+0}=7
	0	1	1	0	1	0	(2,0)	max{2+0+5+2; 0+2+0+0}=9
	0	1	1	0	1	0	(2,0)	max{0+0+5+2+2; 2+4+0+0}=9

Таблица 6

Table 6

Результаты пятого этапа и отсев вариантов

Results of the fifth stage and sifting of options

Этап 5	$x_{1,3}$	$x_{2,3}$	$x_{1,4}$	$x_{2,4}$	$x_{1,5}$	$x_{2,5}$	$f_{i,5}$	$\phi_{i,5} = \{f_{i,5} + \phi_{i,4}\}$, $\phi_5 = \max_i \{\phi_{i,5}\}$
Заявка 1 + + Заявка 2 + + Заявка 3 + + Заявка 4+ + Заявка 5	1	0	0	1	0	1	(0, 2)	max{2+0+5+0+0; 0+2+0+5+2}=9
	0	1	1	0	0	1	(0, 2)	max{2+0+0+3+0; 0+2+4+0+2}=8
	0	1	1	0	0	1	(0, 2)	max{2+3+0+2+0; 0+0+6+0+2}=8
	1	0	1	0	0	1	(0,2+2)	max{2+0+5+2+0; 0+2+0+0+4}=9
	1	0	0	1	1	0	(4, 0)	max{2+0+5+0+4; 0+2+0+5+0}=11

Окончание табл. 6

End tab. 6

Этап 5	$x_{1,3}$	$x_{2,3}$	$x_{1,4}$	$x_{2,4}$	$x_{1,5}$	$x_{2,5}$	$f_{i,5}$	$\phi_{i,5} = \{f_{i,5} + \phi_{i,4}\}$, $\phi_5 = \max_i \{\phi_{i,5}\}$
	0	1	1	0	1	0	(4, 0)	max{2+0+0+3+4; 0+2+4+0+0}=9
	0	1	1	0	1	0	(4, 0)	max{2+3+0+2+4; 0+0+6+0+0}=11
	1	0	1	0	1	0	(4, 0)	max{2+0+5+2+4; 0+2+0+0+0}=13

Все прочие варианты из дальнейшего рассмотрения исключены. Тем самым вдвое сокращено число допустимых вариантов на данных и всех последующих этапах.

Темной заливкой в табл. 7 выделены строки (и варианты назначений), имеющие локально наилучшие промежуточные оценки длины расписания для этапа 6.

Таблица 7

Table 7

Результаты шестого этапа и отсев вариантов

Results of the sixth stage and sifting of options

Этап 6	$x_{1,4}$	$x_{2,4}$	$x_{1,5}$	$x_{2,5}$	$x_{1,6}$	$x_{2,6}$	$f_{i,6}$	$\phi_{i,6} = \{f_{i,6} + \phi_{i,5}\}$, $\phi_6 = \max_i \{\phi_{i,6}\}$
Заявка 1 + + Заявка 2 + + Заявка 3 + + Заявка 4 + + Заявка 5 + + Заявка 6	0	1	0	1	0	1	(0, 3)	max{2+0+5+0+0+0; 0+2+0+5+2+3}=12
	1	0	0	1	0	1	(0, 3)	max{2+0+0+3+0+0; 0+2+4+0+2+3}=11
	1	0	0	1	0	1	(0, 3)	max{2+3+0+2+0+0; 0+0+6+0+2+3}=11 *
	1	0	1	0	0	1	(0, 3)	max{2+0+0+3+4+0; 0+2+4+0+0+3}=9
	0	1	0	1	1	0	(3, 0)	max{2+0+5+0+0+3; 0+2+0+5+2+0}=10
	1	0	0	1	1	0	(3, 0)	max{2+0+0+3+0+3; 0+2+4+0+2+0}=8
	1	0	0	1	1	0	(3, 0)	max{2+3+0+2+0+3; 0+0+6+0+2+0}=10
	1	0	1	0	1	0	(3, 0)	max{2+0+0+3+4+3; 0+2+4+0+0+0}=12

Вдвое сокращено число допустимых вариантов на этапе 6.

Таблица 8

Table 8

Результаты и выбор наилучших вариантов

Results and selection of the best options

Этап 7	$x_{1,5}$	$x_{2,5}$	$x_{1,6}$	$x_{2,6}$	$x_{1,7}$	$x_{2,7}$	$f_{i,7}$	$\phi_{i,7} = \{f_{i,7} + \phi_{i,6}\}$, $\phi_7 = \max_i \{\phi_{i,7}\}$
Заявка 1 + + Заявка 2 + + Заявка 3 + + Заявка 4 + + Заявка 5 + + Заявка 6 + + Заявка 7	1	0	0	1	0	1	(0, 3)	max{2+0+0+3+4+0+0; 0+2+4+0+0+3+3}=12
	0	1	1	0	0	1	(0, 3)	max{2+0+5+0+0+3+0; 0+2+0+5+2+0+3}=12
	0	1	1	0	0	1	(0, 3)	max{2+0+0+3+0+3+0; 0+2+4+0+2+0+3}=11
	0	1	1	0	0	1	(0, 3)	max{2+3+0+2+0+3+0; 0+0+6+0+2+0+0+3}=11
	0	1	0	1	1	0	(4, 0)	max{2+3+0+2+0+0+4; 0+0+6+0+2+3+0}=11 *
	1	0	0	1	1	0	(4, 0)	max{2+0+0+3+4+0+4; 0+2+4+0+0+3+0}=13
	0	1	1	0	1	0	(4, 0)	max{2+0+5+0+0+3+4; 0+2+0+5+2+0+0}=14
	0	1	1	0	1	0	(4, 0)	max{2+0+0+3+0+3+4; 0+2+4+0+2+0+0}=12
	0	1	1	0	1	0	(4, 0)	max{2+3+0+2+0+3+4; 0+0+6+0+2+0+0}=14

Светлой заливкой выделен вариант, исключенный алгоритмом A_P из рассмотрения, но тем не менее дающий впоследствии одно из оптимальных решений. Можно показать, что все полученные варианты расписания оптимальны по быстродействию. Это подтверждается прямым решением задачи (9)–(17) [4].

Темной заливкой на последнем этапе выделены два варианта, оптимальных по быстродействию расписаний, светлой заливкой – вариант оптимального расписания, исключенный из рассмотрения процедурой отсева части вариантов на предшествующем шаге. В табл. 9 и 10 детализированы полученные оптимальные расписания процедурой обратного хода ДП. Таблицы 11 и 12 содержат исключенные алгоритмом A_P из рассмотрения варианты оптимального решения [4].

Таблица 9

Table 9

Наилучшее расписание 1

The best schedule 1

Номер заявки (j)	Назначения: номер прибора (i)		Расписание на выходе системы
	1	2	
1	1	0	2
2	0	1	2
3	0	1	6
4	1	0	5
5	0	1	8
6	1	0	8
7	0	1	11

Таблица 10

Таблица 10

Наилучшее расписание 2

The best schedule 1

Номер заявки (j)	Назначения: номер прибора (i)		Расписание на выходе системы
	1	2	
1	1	0	2
2	1	0	5
3	0	1	6
4	1	0	7
5	0	1	8
6	1	0	10
7	0	1	11

Оценки трудоемкости алгоритма A_P и ДП для рассмотренного примера: $N = (2^8 - 2)/2 = 127$, $N' = (2^2 - 2)/2 + (7 - 3 + 1)2^3 = 41$.

Таблица 11

Table 11

Наилучшее расписание 3

The best schedule 3

Номер заявки (j)	Назначения: номер прибора (i)		Расписание на выходе системы
	1	2	
1	1	0	2
2	0	1	2
3	0	1	6
4	1	0	5
5	0	1	8
6	0	1	11
7	1	0	10

Таблица 12

Таблица 12

Наилучшее расписание 4

The best schedule 4

Номер заявки (j)	Назначения*: номер прибора (i)		Расписание на выходе системы
	1	2	
1	1	0	2
2	1	0	5
3	0	1	6
4	1	0	7
5	0	1	8
6	0	1	11
7	1	0	11

5. УЛУЧШАЮЩИЙ ОБМЕННЫЙ АЛГОРИТМ

Для улучшения решения, полученного алгоритмом A_P, можно применить процедуру, основанную на обмене заявками между приборами. Опишем этот алгоритм.

На первом этапе выбирается прибор с наибольшим суммарным временем обслуживания заявок и производится попытка передачи одной из заявок другому прибору. Если при этом происходит уменьшение значения целевой функции, процесс повторяется, в противном случае рассматривается следующий прибор.

На втором этапе выбирается прибор с наибольшим суммарным временем обслуживания заявок. Последовательно рассматриваются заявки данного прибора. В каждом случае осуществляется поиск заявки, обслуживаемой этим прибором за меньшее время, но назначенной другому прибору. Производится обмен заявками между приборами. Если при этом происходит уменьшение значения целевой функции, второй этап повторяется, в противном случае изменения отменяются и осуществляется поиск другой подходящей для обмена заявки. Общий обменный алгоритм, как и алгоритм, реализуемый на втором этапе, обозначим как A_C. Более подробно A_C на втором этапе можно описать следующим образом.

АЛГОРИТМ A_C

1. Выбирается прибор m с наибольшим суммарным временем обслуживания заявок $\lambda_m = \lambda$.
2. Положим $i := 1$.
3. Если $i := m$, то перейти к п. 14.
4. Положим $l := 1$.
5. Если $x_{m,l} = 0$, то перейти к п. 12.
6. Положим $j := 1$.
7. Если $j = l$, или $x_{i,j} = 0$, или $t_{m,j} \geq t_{m,l}$, или $t_{i,l} - t_{i,j} \geq \lambda_m - \lambda_i$, то перейти к п. 10.
8. Положим $x_{i,j} = 0$, $x_{m,j} = 1$, $x_{i,l} = 1$, $x_{m,l} = 0$.
9. Вычислим значение целевой функции. Если оно уменьшилось, то перейти к п. 1, иначе положить $x_{i,j} = 1$, $x_{m,j} = 0$, $x_{i,l} = 0$, $x_{m,l} = 1$.
10. Положим $j := j + 1$.
11. Если $j \leq J$, то перейти к п. 7.
12. Положим $l := l + 1$.
13. Если $l \leq J$, то перейти к п. 5.
14. Положим $i := i + 1$.
15. Если $i \leq I$, то перейти к п. 3, иначе завершить алгоритм.

6. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Исходные данные тестовых примеров для задач (9)–(17), (1)–(3), (18)–(21) и (1)–(8), были сгенерированы датчиками случайных чисел. Размерность всех тестов одинакова (5 приборов, 100 заявок).

Таблица 13 содержит результаты тестирования реализаций с использованием средств решения бикритериальной релаксации задачи (1)–(8) и представленных выше алгоритмов A_P и A_C.

В табл. 13 t_{da}, λ_{da} – соответственно время решения (в формате часы : минуты : секунды) и значение критерия эффективности в результате применения базового алгоритма, основанного на бикритериальной релаксации с использованием инструментов IBM ILOG CPLEX; t_{dp}, λ_{dp}, p_{dp} и Δ_{dp} – время решения (в секундах), значение критерия, относительное и абсолютное ухудшение (улучшения при отрицательном значении) критерия, достигнутые алгоритмом A_P в сравнении с базовым алгоритмом; λ^c_{dp}, p^c_{dp} и Δ^c_{dp} – те же значения, полученные с применением алгоритма A_C.

В целом очевиден абсолютный выигрыш в быстродействии, объясняемый эффективностью алгоритма A_P и его комбинации с A_C, а также практически полное превосходство в близости получаемых решений к оптимальным в сравнении с базовым алгоритмом.

Таблица 13

Table 13

Сравнительные характеристики алгоритмов

Comparative characteristics of algorithms

№ п/п	t_{da}	λ_{da}	t_{dp}	λ_{dp}	p_{dp}	Δ_{dp}	λ^c_{dp}	p^c_{dp}	Δ^c_{dp}	t_{dp}	λ_{dp}	p_{dp}	Δ_{dp}	λ^c_{dp}	p^c_{dp}	Δ^c_{dp}
	(ч:м:с)	$K' = 10$					A_C			$K' = 11$				A_C		
1	0:07:18	389	17	368	–5,40	–21	364	–6,43	–25	435	363	–6,68	–26	359	–7,71	–30
2	0:15:29	335	18	337	0,60	2	335	0,00	0	436	331	–1,19	–4	329	–1,79	–6
3	0:09:21	401	17	382	–4,74	–19	382	–4,74	–19	438	375	–6,48	–26	375	–6,48	–26
4	0:01:42	356	18	370	3,93	14	366	2,81	10	437	365	2,53	9	361	1,40	5
5	0:12:11	334	17	337	0,90	3	333	–0,30	–1	435	337	0,90	3	337	0,90	3
6	4:43:14	363	17	377	3,86	14	369	1,65	6	434	375	3,31	12	361	–0,55	–2
7	0:11:56	403	18	404	0,25	1	404	0,25	1	434	404	0,25	1	401	–0,50	–2
8	1:34:02	395	17	398	0,76	3	397	0,51	2	433	386	–2,28	–9	386	–2,28	–9
9	0:03:33	364	17	372	2,20	8	372	2,20	8	434	371	1,92	7	371	1,92	7
10	0:15:37	395	17	392	–0,76	–3	366	–7,34	–29	434	389	–1,52	–6	376	–4,81	–19
Среднее					0,16	0,2		–1,14	–4,7			–0,93	–3,9		–1,99	–7,9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом представленной работы является эффективный параметрический алгоритм оптимизации расписаний параллельной системы с задержками поступления заявок, основанный на схеме динамического программирования и отсеве локально наихудших вариантов. Практическая ценность результатов работы заключается не только в обеспечении возможности решения одной из подзадач общей задачи теории расписаний фактически лю-

бой размерности, но и в самостоятельной ценности разработанного инструментария для нужд практики. В частности, актуальны его применения в календарном планировании производственных процессов с дискретным характером. Придадим исходным данным приведенного выше примера следующий содержательный смысл. В качестве заявок рассмотрим места размещения кустов скважин нефтегазоконденсатного месторождения, в качестве приборов – кустовые буровые установки, $t_{i,j}$ – время (в месяцах) строительства и бурения куста j буровой i, τ_j^0 – определенное технологической последовательностью и регламентами время (в месяцах) задержки начала бурения куста j. Тогда полученные решения (табл. 9–12) являются оптимальными по быстродействию расписаниями строительства и бурения семи кустов скважин двумя буровыми установками.

Важным практическим результатом работы явилась возможность достижения компромисса между точностью и быстродействием параметрического алгоритма путем варьирования его входных параметров. Кроме этого, оценена трудоемкость синтеза с его помощью точных и приближенных к оптимальным по быстродействию расписаниям.

Перспективы развития темы связаны с оценками точности алгоритмов решения рассмотренных в работе задач, в применении метода бинарных отсечений [14, 15] и методов решения оценочных задач к общей задаче оптимизации расписаний параллельно-последовательных производственных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brucker P.* Scheduling algorithms. – 5th ed. – Berlin; New York: Springer, 2007. – 372 p.

2. *Pinedo M.* Scheduling theory, algorithms, and systems – 3rd ed. – New York; London: Springer, 2008. – 672 p.

3. Multiprocessor scheduling: theory and applications / ed. by E. Levner. – Vienna, Austria: I-Tech Education and Publishing, 2007. – 436 p.

4. *Мезенцев Ю.А.* Прикладные задачи и алгоритмы оптимизации расписаний параллельных обслуживающих систем // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 1 (62). – С. 49–73.

5. *Мезенцев Ю.А.* Оптимизация расписаний параллельных динамических систем в календарном планировании // Информационные технологии. – 2008. – № 2. – С. 16–23.

6. *Santos F.C., Vilarinho P.M.* The problem of scheduling in parallel machines: a case study // Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2010. – London, 2010. – Vol. 3. – P. 2443–2448.

7. *Kaabi J., Harrath Y.* A survey of parallel machine scheduling under availability constraints // International Journal of Computer and Information Technology. – 2014. – Vol. 3, iss. 2. – P. 238–245.

8. *Lin Y.K., Hsieh H.T., Hsieh F.Y.* Unrelated parallel machine scheduling problem using an ant colony optimization approach // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 6. – P. 1798–1803.

9. *Lin Y.K.* Particle swarm optimization algorithm for unrelated parallel machine scheduling with release dates // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – Vol. 2013. – Art. 409486. – P. 1–9.

10. *Lee W.C., Wu C.C., Chen P.* A simulated annealing approach to makespan minimization on identical parallel machines // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 31, N 3–4. – P. 328–334.

11. *Gharbi A., Haouari M.* Minimizing makespan on parallel machines subject to release dates and delivery times // Journal of Scheduling. – 2002. – Vol. 5, N 4. – P. 329–355.

12. *Vazirani V.* Approximation algorithms. – Berlin; New York: Springer, 2001. – 375 p.

13. *Kashan A.H., Karimi B.* A discrete particle swarm optimization algorithm for scheduling parallel machines // Computers and Industrial Engineering. – 2009. – Vol. 56, N 1. – P. 216–223.

14. *Мезенцев Ю.А.* Метод бинарных отсечений и ветвлений целочисленного программирования // Доклады Академии наук высшей школы РФ. – 2011. – № 1 (16). – С. 12–25.

15. *Mezentsev Yu.A.* Binary cut-and-branch method for solving mixed integer programming problems // 2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (dedicated to the memory of V.F. Demyanov) (CNSA): Proceedings. – St. Petersburg, 2017. – P. 210–212.

Мезенцев Юрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – задачи и методы дискретного программирования. Имеет более 65 публикаций, в том числе четыре монографии. E-mail: mezencev@corp.nstu.ru

Эстрайх Игорь Викторович, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – задачи и методы дискретного программирования. Имеет более 10 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: estrajx@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-87-106

An efficient parametric algorithm for optimal scheduling of unrelated parallel machines with release dates[*]

Yu.A. MEZENTSEV[a], *I.V. ESTRAYKH*[b]

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

[a] *mesyan@yandex.ru, mezencev@corp.nstu.ru* [b] *estrajx@corp.nstu.ru*

Abstract

In this paper we propose a parametric polynomial-time algorithm for optimizing the schedules of a parallel system with input delays which is supplemented by an improving exchange algorithm. The criterion of efficiency in the statement concerned is a maximum speed of the system (Cmax), which ensures uniform loading of devices. The availability of this criterion, as well as delays in starting the service of incoming requests, makes the problem difficult to solve with an a priori estimate of any approximation algorithm equal to 2. The proposed parametric algorithm is based on the scheme of dynamic programming modified with adaptive narrowing of search domain ensuring its computational effectiveness. The formulated problems of synthesis and the proposed algorithm for optimizing the schedules of parallel service systems are focused on practical application of the production processes with a discrete character in scheduling and operational control. We discuss the complexity of exact schedule synthesis and compare it with approximate close to optimal solutions. An illustrative example of using formal statements and the algorithm for synthesizing optimal schedules of the parallel system of the

[*] *Received 30 March 2018.*

type involved is given. The computational experiments performed on specially generated realizations of the problem with large dimensions show good practical results. The final comparative statistics of accuracy and counting time is provided by software implementations of parametric and exchange algorithms with the results of alternative tools showing an undeniable advantage of the algorithms presented in the paper. The computational efficiency of the algorithm based on the procedure of dynamic programming with the elimination of a part of the variants at each step followed by the exchange algorithm is experimentally proved, which makes it possible to provide an acceptable speed and closeness to optimums. The a posteriori estimate of the closeness to optimums of the solutions obtained on the tests available for evaluation did not exceed 5 %.

Keywords: optimal scheduling, parallel production systems, unrelated parallel machines, release date, criterion of processing speed, discrete optimization, effective parametric algorithm, improving exchange algorithm

REFERENCES

1. Brucker P. *Scheduling algorithms*. 5th ed. Berlin, New York, Springer, 2007. 372 p.

2. Pinedo M. *Scheduling theory, algorithms, and systems*. 3rd ed. New York, London, Springer, 2008. 672 p.

3. Levner E., ed. *Multiprocessor scheduling: theory and applications*. Vienna, Austria, I-Tech Education and Publishing, 2007. 436 p.

4. Mezentsev Yu.A. Prikladnye zadachi i algoritmy optimizatsii raspisanii parallel'nykh obsluzhivayushchikh sistem [Applications and algorithms for optimal scheduling of unrelated parallel service systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 1 (62), pp. 49–73.

5. Mezentsev Yu.A. Optimizatsiya raspisanii parallel'nykh dinamicheskikh sistem v kalendarnom planirovanii [Optimization of schedules for dynamic parallel service systems]. *Informatsionnye tekhnologii – Information Technology*, 2008, no. 2, pp. 16–23.

6. Santos F.C., Vilarinho P.M. The problem of scheduling in parallel machines: a case study. *Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2010*, London, 2010, vol. 3, pp. 2443–2448.

7. Kaabi J., Harrath Y. A survey of parallel machine scheduling under availability constraints. *International Journal of Computer and Information Technology*, 2014, vol. 3, iss. 2, pp. 238–245.

8. Lin Y.K., Hsieh H.T., Hsieh F.Y. Unrelated parallel machine scheduling problem using an ant colony optimization approach. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, vol. 6, pp. 1798–1803.

9. Lin Y.K. Particle swarm optimization algorithm for unrelated parallel machine scheduling with release dates. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, art. 409486, pp. 1–9.

10. Lee W.C., Wu C.C., Chen P. A simulated annealing approach to makespan minimization on identical parallel machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 31, no. 3–4, pp. 328–334.

11. Gharbi A., Haouari M. Minimizing makespan on parallel machines subject to release dates and delivery times. *Journal of Scheduling*, 2002, vol. 5, no. 4, pp. 329–355.

12. Vazirani V. *Approximation algorithms*. Berlin, New York, Springer, 2001. 375 p.

13. Kashan A.H., Karimi B. A discrete particle swarm optimization algorithm for scheduling parallel machines. *Computers and Industrial Engineering*, 2009, vol. 56, no. 1, pp. 216–223.

14. Mezentsev Yu.A. Metod binarnykh otsechenii i vetvlenii tselochislennogo programmirovaniya [Branch and binary cuts approach of integer programming]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2011, no. 1 (16), pp. 12–25.

15. Mezentsev Yu.A. Binary cut-and-branch method for solving mixed integer programming problems. *2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (dedicated to the memory of V. F. Demyanov) (CNSA): Proceedings*, St. Petersburg, 2017, pp. 210–212.

Для цитирования:

Мезенцев Ю.А., Эстрайх И.В. Эффективный параметрический алгоритм оптимизации расписаний параллельных систем с заданным расписанием начала обслуживания // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 87–106. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-87-106.

For citation:

Mezentsev Yu., Estraykh I. Effektivnyi parametricheskii algoritm optimizatsii raspisanii parallel'nykh sistem s zadannym raspisaniem nachala obsluzhivaniya [An efficient parametric algorithm for optimal scheduling of unrelated parallel machines with release dates]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 87–106. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-87-106.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 107–120

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 107–120

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.3.01:681.3.068 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-107-120

Система имитационного моделирования динамических автоматных сетей*

И.В. ЦАРЕВ

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

civ@iias.spb.su

Данная работа посвящена отдельным аспектам создания программной системы имитационного моделирования сложных вычислительных систем с сетевой структурой, основанных на модели параллельных вычислений, известной как «динамические автоматные сети». В число таких систем входят мультипроцессоры и суперкомпьютеры с динамической архитектурой. Система имитационного моделирования динамических автоматных сетей позволяет на этапе разработки исследовать работоспособность структуры таких систем, а также структур, функций и алгоритмов работы отдельных компонентов системы, осуществлять исследование проектируемой системы с целью доказательства ее работоспособности, а также оценки основных характеристик системы. В результате данной работы разработана структура системы имитационного моделирования, предложен неалгоритмический язык для описания моделируемых систем и решаемых на них задач, транслятор для преобразования описания системы во внутреннее представление, используемое в качестве входной информации как для программы имитационного моделирования, так и для реальной разрабатываемой аппаратуры. Разработаны алгоритмы работы транслятора, позволяющие осуществлять настройку транслятора на конкретную версию языка с возможностью изменения синтаксиса и семантики языка. Разработаны основные алгоритмы и структуры данных системы моделирования. Отмечены основные проблемы создания такой системы имитационного моделирования и определены возможные способы решения этих проблем. Практическая значимость предложенных решений состоит в возможности исследования работоспособности и характеристик сложных вычислительных систем с сетевой структурой, создаваемых на основе динамических автоматных сетей. Разработанная система имитационного моделирования позволяет определить работоспособность проектируемой системы и оценить ее основные характеристики.

Ключевые слова: динамические автоматные сети, автотрансформация, параллельные вычисления, суперкомпьютеры с динамической архитектурой, имитационное моделирование, неалгоритмические языки программирования, трансляторы, алгоритмы моделирования автоматных сетей

* *Статья получена 14 марта 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Создание высокопроизводительных вычислительных систем, называемых также «суперкомпьютерами», является одним из важнейших направлений развития современной вычислительной техники. Самые мощные современные суперкомпьютеры достигли петафлопного диапазона производительности, т. е. могут теоретически выполнять 10^{18} и более операций в секунду. Однако подавляющее большинство таких суперкомпьютеров имеет ряд общих недостатков, к которым можно отнести прежде всего высокое энергопотребление, значительные геометрические размеры и крайне высокую стоимость (обычно эти характеристики представляются как удельные, т. е. в расчете на единицу производительности). Одной из основных причин этого являются устаревшие подходы к проектированию архитектуры таких вычислительных средств.

В связи с этим постоянно предпринимаются попытки решить эти проблемы за счет принципиальных изменений в архитектуре как подобных систем в целом, так и отдельных процессоров, входящих в их состав. Примеров таких попыток существует огромное количество. В качестве одного из многочисленных примеров можно привести концепцию, приведенную в статье Ю.И. Митропольского [1]. Однако эта концепция, как и многие другие, всё же основывается на традиционной архитектуре вычислительных средств (процессоров или их множеств).

Более перспективными представляются работы, основанные на программируемой (или реконфигурируемой) архитектуре, наиболее яркими из которых представляются работы НИИ МВС ЮФУ (НИИ многопроцессорных вычислительных систем Южного федерального университета, г. Таганрог), описания которых можно найти в работах [2, 3]. В данном случае реконфигурация вычислительной системы осуществляется при помощи соответствующих программных средств однократно, перед решением задачи. В процессе решения задачи конфигурация системы не меняется, впрочем, и эти системы по удельным характеристикам оказываются существенно более эффективными, чем большинство существующих суперкомпьютеров, прежде всего за счет экономии аппаратных средств, настраиваемых на решение конкретной задачи.

Более перспективным для повышения эффективности суперкомпьютеров является использование идеи машин (мультипроцессоров) с динамической архитектурой (МДА), основанных на концепции динамических автоматных сетей, рассматриваемой ниже.

Проектирование вычислительных систем требует на разных стадиях исследования их работоспособности и прогнозируемых характеристик посредством программного моделирования.

Имитационное моделирование является общепринятым методом исследования любых вычислительных систем, традиционно применяемым на различных этапах разработки их структуры и проектирования конкретных аппаратных устройств любой сложности. Тем более применение этих методов является крайне важным при разработке современных сложных многопроцессорных систем, таких как суперкомпьютеры, а также любых систем с сетевой

структурой (например, мультипроцессоров и суперкомпьютеров с динамической архитектурой).

Целью данной работы является разработка структуры, методов и алгоритмов программной системы имитационного моделирования, позволяющей моделировать различные вычислительные системы с параллельной обработкой информации, включая мультипроцессоры (и суперкомпьютеры) с динамической архитектурой (МДА, СКДА).

Динамические автоматные сети (ДАС) – это разработанная в СПИИРАН в 80-х годах прошлого века мощная и универсальная модель любых вычислений с параллельными вычислениями любой степени вычислительной сложности. На основе модели ДАС был разработан и реализован целый ряд МДА и СКДА, некоторые из которых были успешно испытаны (включая государственные испытания МДА ЕС-2704 в конце 80-х годов) на различных задачах и применялись в нескольких научных и научно-технических организациях СССР и РФ.

Концепция ДАС основана отчасти на теории самовоспроизводящихся автоматов фон-Неймана [4], а также частично на работах Улама [5] и Бардзиня [6], но в целом является вполне самостоятельной.

Динамическая автоматная сеть включает в себя теоретически неограниченное количество динамических автоматов (ДА) с произвольным набором вычислительных функций и практически любой конфигурацией связей между ними. Эти ДА соединены посредством связей в сеть с некоторой заранее определенной начальной конфигурацией. Любой ДА принадлежит к одному из двух классов – «операторы» и «данные» (автоматы последнего класса также называются ресурсными автоматами), также ДА могут быть «структурными автоматами», представляющими собой подсети, копии которых с соответствующими изменениями могут порождаться в процессе вычислений.

В общем случае в процессе вычислений конфигурация ДАС постоянно изменяется, порождаются новые автоматы и связи, в начале вычислений количество ДА увеличивается, позднее – уменьшается, поскольку автоматы, выполнившие свою функцию, уничтожаются, в чём, собственно, и состоит «динамика» автоматной сети. Этот процесс называется автотрансформацией динамической автоматной сети. В конце вычислительного процесса в ДАС остаются только ДА класса «данные», совокупность и структура которых и представляет собой результат вычислений. В то же время возможны и структуры ДАС, которые не уничтожаются в процессе вычислений, постоянно получают новые данные на входах ДАС и вырабатывают новые результаты. Такие ДАС могут, например, использоваться в системах обработки сигналов, в системах обработки телеметрической информации, в системах искусственного интеллекта и во множестве других систем. Более подробное изложение теоретических и практических аспектов ДАС, включая и историю создания, можно найти в работах [7–12].

Теория ДАС не накладывает никаких ограничений на набор функций операторных автоматов, а гибкость рассматриваемой в данной работе системы имитационного моделирования ДАС позволяет вводить новые вычислительные функции автоматов по мере необходимости. Существенным свойством ДАС, которое может быть использовано как для разработки

МДА/СКДА, так и других вычислительных систем с сетевой архитектурой, является возможность представления массивов или любых других сложных структур из автоматов.

В течение последних двадцати пяти лет никаких работ в области ДАС и МДА, кроме работ сотрудников СПИИРАН, нигде в мире не выполнялось, хотя эти работы широко известны, и никаких принципиально новых решений в этой области предложено не было. Этим объясняется отсутствие в данной статье ссылок на работы, кроме вышеупомянутых.

Данная статья посвящена рассмотрению некоторых аспектов разработки системы программного моделирования ДАС (СИМДАС), включая общую структуру системы и некоторые основные алгоритмы работы системы, а также основных проблем, возникающих при ее создании. Поскольку СИМДАС включает в себя довольно разнородные и сложные компоненты, рассмотреть их подробно в рамках одной статьи представляется невозможным и может быть предметом нескольких отдельных статей. Так что настоящую статью можно считать «постановочной», подразумевая дальнейшую серию публикаций. Кроме того, разработка и отладка самой программы СИМДАС на данный момент еще не завершена, так что возможно появление в дальнейшем дополнительных проблем, не рассмотренных здесь.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одной из основных задач настоящей работы является разработка структуры системы моделирования ДАС и различных вычислительных средств на их основе, в том числе высокопроизводительных вычислительных систем – мультипроцессоров и суперкомпьютеров с динамической архитектурой (МДА, СКДА), а также разработка соответствующих программ.

Такая система позволит показать возможность представления СКДА в виде динамической автоматной сети, провести эксперименты на основе имитационного моделирования ДАС, а также оценить временные и другие характеристики ДАС для их дальнейшей практической реализации.

Анализ задачи показал, что помимо собственно рассматриваемой программы имитационного моделирования (симуляции) необходимы также средства для построения исходной ДАС-программы в формате, который является входным для программы моделирования, а также для проектируемой аппаратуры МДА/СКДА. Под ДАС-программой (или ДАС-файлом) понимается некоторая структура данных, соответствующая внутреннему представлению начального состояния ДАС, предназначенной для решения некоторой конкретной задачи, наряду с числовыми данными. Таким образом, задача сводится не только к созданию собственно программы моделирования, но и некоторого входного языка и транслятора с него в коды, потребляемые этой программой в качестве входных данных. В результате становится необходимым создание некоторой системы программирования, а не только самой моделирующей программы. Структура такой системы рассмотрена ниже.

2. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАС

В состав системы имитационного моделирования ДАС (СИМДАС) входят следующие компоненты:

- язык программирования ЯРД-2017;
- транслятор с языка программирования ЯРД-2017 во внутреннее представление ДАС (ДАС-файл);
- программа моделирования ДАС.

На рис. 1 представлена структура СИМДАС в виде, аналогичном тому, как показана технология решения задач на основе ДАС, изображенная в статье [13] на рис. 3. Как видно из этих рисунков, общая схема работы с СИМДАС отличается от этой технологии прежде всего тем, что вместо аппаратной реализации МДА (СКДА) используется моделирующая программа.

3. ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ ЯРД-2017 И КОМПИЛЯТОР

Язык программирования ЯРД-2017 разработан на основе языка ЯРД, который впервые был сформулирован в середине 90-х годов, тогда же был создан и первый транслятор с этого языка, в 2007–2008 годах язык был несколько скорректирован. Краткое описание этой версии языка ЯРД приведено в статье [14]. Ряд конструкций языка был ориентирован на структуры аппаратных реализаций МДА, которые существовали в то время. В частности, одной из особенностей тех реализаций была возможность программировать исполнительные, управляющие и коммутационные функции динамических автоматов. Это нашло свое отражение и в некоторых структурах языка, предполагавшего максимальную гибкость системы программирования. Это не влияло принципиально на синтаксис самого языка, но влияло на представление некоторых структур данных и конструкций, определяющих функции операторов, которые, в частности, могли быть представлены на уровне аппаратной реализации. Современная концепция аппаратной реализации предполагает существенное упрощение структуры и функций ДА (см., например, статью [15]), что, в свою очередь, отражается и на языке.

Разработанный в рамках настоящей работы язык программирования ЯРД-2017, сохраняя основные принципы и синтаксический стиль исходного языка ЯРД, был существенно упрощен. Рассмотрение синтаксиса и семантики языка не входит в рамки этой статьи, а список упрощений языка весьма объемный, что также не позволяет его вместить в объем статьи. Однако некоторые особенности новой версии языка приведены в [13].

Следует упомянуть некоторые характеристики транслятора (компилятора) с языка ЯРД-2017 в ДАС-программу. Структура компилятора показана на рис. 2. Как и в любом трансляторе, в нем имеются типовые основные части – лексический анализатор, синтаксический анализатор и генератор кода. Лексический анализатор основан на традиционных алгоритмах разбора автоматной грамматики, но позволяет настраивать его на конкретный вариант лекси-

ческой части грамматики. Синтаксический анализатор построен на основе модифицированного алгоритма Эрли [16]. Модификация этого широко известного алгоритма состоит в значительной оптимизации использования оперативной памяти, экономится до 80 % используемой памяти по сравнению с классической формой алгоритма. Синтаксический анализатор, так же как и лексический, допускает настройку на конкретный вариант грамматики языка, последняя описывается в традиционном виде – в модифицированной форме Бэкуса-Наура (МБНФ). Настройка компилятора на конкретную грамматику осуществляется специальными утилитами, преобразующими текстовое представление грамматики во внутреннюю форму, которая и используется для настройки анализаторов. Синтаксический анализатор строит дерево разбора, а генератор кода преобразует его в ДАС-программу. Это является достаточно простой задачей, поскольку структура ДАС-программы является сетевой и, как правило, имеет вид дерева. К сожалению, объем статьи не позволяет подробно рассмотреть структуру ДАС-программы. Следует отметить, что по аналогии со структурой самой ДАС, она представляет собой множество расположенных в произвольном порядке дескрипторов ДА и структур данных, представляющих собой тела ДА и связанных между собой различными связями (ссылками на положение в файле других дескрипторов). Тело структурного оператора представляет собой массив ссылок на дескрипторы узлов, составляющих некоторую подсеть, реализующую функции структурного оператора. ДАС-программа (ДАС-файл) является основной входной информацией для программы имитационного моделирования ДАС наряду с массивами обрабатываемых данных.

4. АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО АВТОМАТА

Программа моделирования разработана на языке программирования Borland Pascal With Objects в среде программирования Delphi-7. В программе широко используются методы модульного и объектно ориентированного программирования.

Рассмотрим два основных алгоритма работы СИМДАС, определяющих работу динамических автоматов и, как следствие, ДАС в целом. Но прежде нужно привести описание структуры дескриптора ДА в таком виде, в каком оно присутствует в программе СИМДАС – дескриптор ДА представляется как объект (класс). Назначение полей структуры и методов объекта (процедур и функций) указано в комментариях. В целом описываемая структура соответствует той, которая изображена на рис. 2 в статье [13].

```
Type
  RefDA = ^TDADescriptor; {ссылка на дескриптор ДА}
  TDADescriptor = class {описание дескриптора ДА}
    TypeAndStatus: DoubleWord; {тип и статус ДА}
    BodySize: Integer; {размер тела ДА}
    Body: DoubleWord;
    Master: RefDA; {ссылка на «хозяина» ДА}
    NumberInMaster: Integer; {номер данного ДА в теле «хозяина»}
```

```
        ArgResNumber:    DoubleWord;    {количество    аргумен-
тов/результатов}
        Arg1: RefDA; {ссылка на дескриптор первого аргумента}
        Arg1Parameter1: DoubleWord; {параметры аргумента}
        Arg1Parameter2: DoubleWord;
        Arg2: RefDA; {ссылка на дескриптор второго аргумента}
        Arg2Parameter1: DoubleWord;
        Arg2Parameter2: DoubleWord;
        Res: RefDA; {ссылка на дескриптор результата}
        ResParameter1: DoubleWord; {параметры результата}
        ResParameter2: DoubleWord;
        procedure Create(Source: RefDA; FreeDA_Pool: TList);
    {процедура создания ДА}
        procedure Destroy(Source: RefDA; FreeDA_Pool: TList);
    {процедура уничтожения ДА, выполнившего свою функцию}
        procedure Control; {процедура выполнения управляющей
функции ДА}
        function CheckReady : Boolean; {функция проверки го-
товности ДА}
        function CheckUndefined : Boolean; {функция проверки
состояния неопределённости ДА}
        procedure Execute(var Successful: Boolean); {процедура
выполнения исполнительной (вычислительной) функции ДА}
        procedure GenerateSubnet (Node: RefDA); {процедура со-
здания (генерации) подсети структурного оператора}
        procedure GetStatus (var DA_Status : DoubleWord);
{процедура получения статуса (состояния) ДА}
        procedure ChangeStatus (var DA_Status : DoubleWord);
{процедура изменения статуса (состояния) ДА}
        procedure GetType (var DA_Type : DoubleWord); {проце-
дура получения типа ДА}
        procedure ChangeType (var DA_Type : DoubleWord); {про-
цедура изменения типа ДА}
        procedure SetToControlQueue (ControlQueue : TQueue);
{процедура постановки ДА в очередь к управляющей подсистеме}
        procedure GetFromControlQueue (ControlQueue : TQueue);
{процедура извлечения ДА из очереди к управляющей подсистеме}
        procedure SetToExecQueue (ExecQueue : TQueue); {проце-
дура постановки ДА в очередь к исполнительной подсистеме}
        procedure GetFromExecQueue (ExecQueue : TQueue); {про-
цедура извлечения ДА из очереди к исполнительной подсистеме}
    end;
```

Отбросив многочисленные вспомогательные функции системы, а также функции компилятора, рассмотрим основные алгоритмы работы модуля, который определяет работу программы СИМДАС в целом. Следует отметить, что работа этой основной части системы осуществляется с помощью системы очередей, реализуемых как кольцевые двусторонние списки. Основными являются очереди к управляющей и исполнительной подсистемам.

При работе модуля (по сути это основная часть программы моделирования ДАС) выполняются следующие шаги алгоритма.

Шаг 1. Создание списка (пула) свободных автоматов FreeDA_Pool. При этом используется параметр «количество свободных автоматов», задаваемый в настройках программы СИМДАС, и выделяется соответствующая память. Если программа работает в режиме использования виртуальной памяти, то создается образ соответствующей структуры данных на жестком диске.

Шаг 2. Ввод исходного ДАС-файла (файла ДАС-программы).

Шаг 3. Для каждого дескриптора из ДАС-файла в цикле выполняется создание множества динамических автоматов при помощи процедуры Create. Если дескриптор описывает некоторый массив данных или структурный оператор, то выделяется память для тел соответствующих объектов (динамических автоматов). Каждый созданный автомат ставится в очередь к управляющей подсистеме.

Шаг 4. Основной цикл работы программы СИМДАС. Рассматривается отдельно (ниже).

Шаг 5. Завершение работы программы. Выполняется в случае, если в ДАС не остается ни одного активного элемента (оператора), т. е. очереди к управляющей и исполнительной системам пусты.

Шаг 6. Освобождение памяти всех структур данных – списка свободных автоматов, очередей и данных.

Теперь рассмотрим работу основного цикла программы (шаг 4 предыдущего алгоритма). Основная часть алгоритма работы ДАС выполняется в цикле, выполнение которого заканчивается только при отсутствии активных элементов в ДАС, либо в случае критической ошибки (аварийное завершение). Однако существуют случаи, когда цикл принципиально не заканчивается (а в случае критической ошибки предпринимаются некоторое специальные действия, не прерывающие выполнения программы). К таким случаям относятся, например, выполнение задачи обработки сигналов и других задач, упомянутых выше.

В реальной аппаратуре МДА/СКДА все функции всех динамических автоматов выполняются параллельно и одновременно, включая управляющие и исполнительные функции каждого автомата. В моделирующей программе, которая в принципе является последовательной, использование многопоточного выполнения программы (многоядерного программирования) принципиального значения не имеет, это лишь увеличивает производительность программы, роль управляющих и исполнительных функций автоматов выполняют соответствующие подсистемы программы (управляющая и исполнительная). Для имитации параллельного исполнения в цикле выполняется сначала некоторая последовательность действий управляющей подсистемы (шаги 1–6 нижеописанного алгоритма), а затем некоторая последовательность действий исполнительной подсистемы (шаги 7–12 нижеописанного алгоритма).

Таким образом, в этом потенциально бесконечном цикле выполняются следующие действия.

Шаг 1. Извлечение очередного объекта (автомата, а точнее, его дескриптора) из очереди к управляющей подсистеме.

Шаг 2. Определение состояния извлеченного объекта.

Шаг 3. Если объект не готов, то пропускаются шаги 4–6, а сам объект ставится снова в очередь к управляющей подсистеме (в конец очереди).

Шаг 4. Если объект готов, то определяются состояния связанных с ним объектов.

Шаг 5. Если аргументы данного оператора готовы, а результат находится в неопределенном состоянии, то объект ставится в очередь к исполнительной подсистеме.

Шаг 6. Объект удаляется из входной очереди (сдвигается соответствующий указатель очереди).

Шаг 7. Извлечение очередного объекта (автомата, а точнее, его дескриптора) из очереди к исполнительной подсистеме.

Шаг 8. Если объект структурный, то выполняется порождение подсети, описание которой имеется в описании соответствующего структурного объекта (соответствующие структурные дескрипторы имеются в исходном ДАС-файле), т. е. выполняется процедура GenerateSubnet. При этом пропускаются шаги 9–12. Все порожденные объекты ставятся в очередь к управляющей подсистеме.

Шаг 9. Выполняется процедура Execute текущего объекта. Она представляет собой большой оператор case, селектором которого является код операции данного оператора. В каждой ветви оператора case производятся вычисления, соответствующие коду операции данного оператора.

Шаг 10. Результат операции записывается в дескриптор или в тело автомата, соответствующего результату. Запись в тело подразумевает запись в соответствующий элемент массива, являющегося результатом, в соответствии с индексами, указанными в дескрипторе оператора. Если в качестве результата выступает другой оператор, то данный оператор изменяет свой класс на класс «данные» (выполняется процедура ChangeType). Результату присваивается состояние готовности, и он ставится в очередь к управляющей подсистеме..

Шаг 11. Уничтожаются объекты, являющиеся аргументами данного оператора, если они не являются также аргументами других операторов.

Шаг 12. Если тип оператора не был изменен на тип данных и оператор не имеет признака «статический», то он уничтожается.

Шаг 13. Если в обеих очередях к управляющей и исполнительной подсистемам не содержится ни одного объекта (автомата) либо если произошла критическая ошибка, то устанавливается признак завершения цикла (цикл завершается).

Следует отметить, что вышеприведенные описания алгоритмов являются крайне упрощенными и предназначены лишь для приблизительного понимания принципов работы разрабатываемой программы имитационного моделирования ДАС.

5. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАС

Можно выделить две основные проблемы, от решения которых зависит эффективность работы системы, а также возможность исследования некоторых характеристик моделируемых МДА и СКДА на основе ДАС.

Первая проблема заключается в количественных характеристиках моделируемых систем МДА (СКДА).

При разработке программы моделирования учитывались ранее полученные результаты анализа проблем моделирования вычислений ДАС, являющихся принципиально параллельными и многопроцессорными. Имеется в виду, что под «множеством процессоров» на самом деле понимается множество элементарных динамических автоматов ДА. При этом следует учесть, что количество ДА в СКДА может быть весьма велико – несколько миллионов и миллиардов.

В то же время в обычных условиях исследователи и разработчики таких систем не имеют доступа к мощным суперкомпьютерам и вынуждены использовать для моделирования пусть мощные, но персональные компьютеры. Например, в распоряжении автора настоящей статьи имеется компьютер на базе четырехъядерного процессора Intel Core i7 с тактовой частотой 2.66 гигагерца, тремя гигабайтами оперативной памяти и двумя жесткими дисками общим объемом 3 терабайта. Таким образом, мы вынуждены моделировать принципиально параллельные вычислительные процессы в среде последовательно работающих вычислительных средств. Использование многоядерных процессоров (например, вышеупомянутого процессора Intel Core i7, позволяющего с учетом гипертрейдинга организовать одновременное выполнение восьми потоков) не меняет принципиально ситуации, лишь несколько повышая производительность.

Таким образом, данная проблема сводится к обработке очень больших объемов информации и, учитывая последовательное выполнение вычислений, весьма большого времени проведения экспериментов. Первое приводит к необходимости использования виртуальной памяти, а второе – к необходимости периодического прерывания моделирования с сохранением полного текущего состояния системы. Виртуальная память позволяет без особых дополнительных средств решить проблему постоянного сохранения текущего состояния модели с целью возможной приостановки процесса моделирования и последующего его возобновления. В то же время организация виртуальной памяти должна быть осуществлена в рамках данной программы, по возможности без использования соответствующих механизмов, поддерживаемых операционной системой, поскольку управление последними крайне затруднено и неэффективно.

Вторая проблема заключается в оценке некоторых характеристик моделируемой системы и прежде всего – временных характеристик. В вычислительной модели ДАС не существует общего времени, каждый автомат имеет собственное время, а синхронизация работы всего множества автоматов осуществляется по событиям, главными из которых являются события изменения статуса (состояния) отдельных динамических автоматов, в результате чего активируются автоматы, связанные с ними. Для измерения временных характеристик моделируемой системы необходим некоторый механизм привязки собственного времени автомата к общей шкале реального времени. То есть каждый автомат должен иметь свой счетчик времени, но привязанный к общей шкале времени. При возникновении некоторого события автомат копирует текущее глобальное время и отсчитывает свое собственное время от него, добавляя к нему время выполнения собственной вычислительной функции. Таким образом, все автоматы, инициализация работы которых

привязана к данному событию, будут учитывать одно и то же время, хотя в последовательной моделирующей программе эта работа выполняется в разные моменты времени.

Обе эти проблемы вполне решаемы, но объем статьи не позволяет рассмотреть их более подробно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным практическим результатом работы является разработка системы имитационного моделирования ДАС (СИМДАС), дающая возможность исследования работоспособности и оценки характеристик любой сложной вычислительной системы с сетевой структурой, проектируемой на основе динамических автоматных сетей. К таким системам относятся мультипроцессоры, включая суперкомпьютеры, с динамической архитектурой, создаваемые на основе ДАС. Система СИМДАС обладает высокой степенью гибкости, что выражается не только в возможности описания структуры и функций любой такой системы на языке программирования ЯРД-2017, но и в возможности изменения синтаксиса и семантики самого языка в соответствии с особенностями моделируемой вычислительной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Митропольский Ю.И.* Новые концепции построения вычислительных суперсистем // Труды Физико-технологического института. – 2016. – Т. 25. – С. 22–37.

2. *Каляев А.В.* Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой. – М.: Радио и связь, 1984. – 240 с.

3. *Каляев И.А., Левин И.И.* Многопроцессорные вычислительные структуры с динамически реконфигурируемой архитектурой на основе ПЛИС // Сборник научных трудов ИТМиВТ. – М., 2008. – Вып. 1: Материалы конференции «Перспективы развития высокопроизводительных архитектур. История, современность и будущее отечественного компьютеростроения». – С. 44–45.

4. *Neuman J. von.* Theory of self-reproducing automata. – Urbana; London: University of Illinois Press, 1966. – 403 p.

5. *Ulam S.M.* Random processes and transformations // Proceedings of the International Congress of Mathematicians, Cambridge, 1950. – Providence, 1952. – Vol. 2. – P. 264–275.

6. *Барзинь Ю.М.* Проблема универсальности растущих автоматов // Доклады АН СССР. – 1964. – Т. 57, № 3. – С. 542–545.

7. *Торгашев В.А.* Автоматные сети и компьютеры: история развития и современное состояние // История информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде). – СПб.: Наука, 2012. – Вып. 3. – С. 46–66.

8. *Торгашев В.А.* Динамические автоматные сети // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 4 (27). – С. 23–34.

9. *Торгашев В.А., Царев И.В.* Средства организации параллельных вычислений и программирования в мультипроцессорах с динамической архитектурой // Программирование. – 2001. – № 4. – С. 53–68.

10. *Торгашев В.А., Царев И.В.* Семейство суперкомпьютеров с динамической архитектурой – концептуальные основы // Искусственный интеллект. – 2009. – № 3. – С. 251–257.

11. *Торгашев В.А., Царев И.В.* Суперкомпьютерные технологии на базе динамических автоматных сетей // Суперкомпьютерные технологии: разработка, программирование, примене-

ние» (СКТ-2010): материалы Международной научно-технической конференции. – Таганрог, 2010. – Т. 1. – С. 161–165.

12. *Торгашев В.А., Царев И.В.* Динамические автоматные сети как модель параллельных вычислений в мультипроцессорах с динамической архитектурой // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 3. – С. 11–20.

13. *Торгашев В.А., Царев И.В.* Технологии решения сложных задач на основе динамических автоматных сетей // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 6. – С. 57–65.

14. *Царев И.В.* ЯРД – язык сетевого программирования в распределенных вычислительных системах с динамической архитектурой // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 761–770.

15. *Торгашев В.А., Царев И.В.* Реализация суперкомпьютеров с динамической архитектурой на современной элементной базе // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 6. – С. 74–84.

16. *Earley J.* An efficient context-free parsing algorithm // Communications of the ACM. – 1970. – Vol. 13, N 2. – P. 94–102.

Царев Игорь Владимирович, ведущий программист лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий программирования Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. Основное направление научных исследований – системы программирования и организация параллельных вычислений в суперкомпьютерах с динамической архитектурой, языки программирования, трансляторы, операционные системы. Имеет более 40 публикаций. E-mail: civ@iias.spb.su

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-107-120

A system for simulation modeling of dynamic automata networks[*]

I.V. TSAREV

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 39, 14th Line, V. O., 199178, St. Petersburg, Russian Federation

civ@iias.spb.su

This paper is devoted to some aspects of creation a program system for simulation modeling of complex computer systems with a network structure based on the model of parallel computations known as “dynamic automata networks”. Such systems as multiprocessors and supercomputers with a dynamic architecture belong to these systems. The system of simulation modeling of dynamic automata networks makes it possible to investigate the operability of the structure of such systems as well as structures, functions and algorithms of individual components of the system on the stage of development, and to assess the main characteristics of the system designed. This research resulted in developing the structure of the system for simulation modeling. In addition, a non-algorithmic programming language to describe simulated systems and problems being solved on such systems is proposed. A compiler to convert the description of the system into an internal representation used as input information both for the program of simulation modeling and for real devices being developed. Algorithms of the compiler permitting us to perform tuning of the compiler for a concrete version of a programming language with a possibility of changing the syntax and semantics of the language are developed. The main algorithms and data structures of the simulation system are developed. General problems of creation of such a system are noted and some possible ways for solving these problems are defined. The practical value of the solutions proposed consists in a possibility of examining the

[*] *Received 14 March 2018.*

operability and characteristics of complex computing systems with the network structure created on the basis of dynamic automata networks. The developed system of simulation modeling permits us both to define the operability of the system being designed and to evaluate its basic characteristics.

Keywords: dynamic automata networks, autotransformation, parallel computations, supercomputers with a dynamic architecture, simulation modeling, non-algorithmic programming languages, compilers, algorithms of modeling automata networks

REFERENCES

1. Mitropol'skii Yu.I. Novye kontseptsii postroeniya vychislitel'nykh supersistem [New concepts for construction of computing supersystems]. *Trudy Fiziko-tekhnologicheskogo instituta*, 2016, vol. 25, pp. 22–37. (In Russian).

2. Kalyaev A.V. *Mnogoprotsessornye sistemy s programmiruemoi arkhitekturoi* [Multiprocessor systems with programmable architecture]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 240 p.

3. Kalyaev I.A., Levin I.I. [Multiprocessor computing structures with dynamically reconfigurable architecture on the base of FPGA]. *Sbornik nauchnykh trudov: ITMiVT* [Collection of proceedings of Lebedev Institute of Precise Mechanics and Computer Engineering]. Moscow, 2008, iss. 1, pp. 44–45. (In Russian).

4. Neuman J. von. *Theory of self-reproducing automata*. Urbana, London, University of Illinois Press, 1966. 403 p.

5. Ulam S.M. Random processes and transformations. *Proceedings of International Congress of Mathematicians*, Cambridge, 1950. Providence, 1952, vol. 2, pp. 264–275.

6. Barzin' Yu.M. Problema universal'nosti rastushchikh avtomatov [The problem of universality of growing automata]. *Doklady Akademii nauk SSSR – Proceedings of the Russian Academy of Sciences*, 1964, vol. 57, no. 3, pp. 542–545.

7. Torgashev V.A. Avtomatnye seti i komp'yutery: istoriya razvitiya i sovremennoe sostoyanie [Automata networks: history of development and contemporary state]. *Istoriya informatiki i kibernetiki v Sankt-Peterburge (Leningrade)* [History of informatics and cybernetics in Saint-Petersburg (Leningrad)]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2012, vol.3, pp. 46–66.

8. Torgashev V.A. Dinamicheskie avtomatnye seti [Dynamic automata networks]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2013, vol. 4 (27), pp. 23–34.

9. Torgashev V.A., Tsarev I.V. Sredstva organizatsii parallel'nykh vychislenii i pro-grammirovaniya v mul'tiprotsessorakh s dinamicheskoi arkhitekturoi [Means for organization of parallel computations and programming in multiprocessors with dynamic architecture]. *Programmirovanie – Programming and Computer Software*, 2001, no. 4, pp. 53–68.

10. Torgashev V.A., Tsarev I.V. Semeistvo superkomp'yuterov s dinamicheskoi arkhitekturoi – kontseptual'nye osnovy [Conceptual basis for a family of supercomputers with dynamic architecture]. *Iskusstvennyi intellect – Artificial Intelligence*, 2009, no. 3, pp. 251–257.

11. Torgashev V.A., Tsarev I.V. Supercomputer technologies on the base of dynamic automata networks. *Superkomp'yuternye tekhnologii: razrabotka, programmirovanie, primenenie (SKT-2010)*: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Proceedings of International Scientific-Technical Conference "Supercomputer Technologies: Development, Programming, Implementation" (SCT-2010)]. Taganrog, 2010, vol. 1, pp. 161–165. (In Russian).

12. Torgashev V.A., Tsarev I.V. Dinamicheskie avtomatnye seti kak model' parallel'nykh vychislenii v mul'tiprotsessorakh s dinamicheskoi arkhitekturoi [Dynamic automata networks as a model of parallel computations in the multiprocessors with dynamic architecture]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii – Herald of computer and information technologies*, 2009, no. 3, pp. 11–20.

13. Torgashev V.A., Tsarev I.V. Tekhnologii resheniya slozhnykh zadach na osnove dinamicheskikh av-tomatnykh setei [Technologies of solving complicated problems on the base of dynamic

automata networks]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy – Information and Control Systems*, 2015, no. 6, pp. 57–65.

14. Tsarev I.V. YaRD – yazyk setevogo programmirovaniya v raspredelennykh vychislitel'nykh sistemakh s dinamicheskoi arkhitekturoi [YARD – a language for network programming in distributed computing systems with dynamic architecture]. *Iskusstvennyi intellect – Artificial Intelligence*, 2008, no. 3, pp. 761–770.

15. Torgashev V.A., Tsarev I.V. Realizatsiya superkomp'yuterov s dinamicheskoi arkhitekturoi na sovremennoi elementnoi baze [Modern circuitry implementation of dynamic architecture supercomputers]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy – Information and Control Systems*, 2016, no. 6, pp. 74–84.

16. Earley J. An efficient context-free parsing algorithm. *Communications of the ACM*, 1970, vol. 13, no. 2, pp. 94–102.

Для цитирования:

Царев И.В. Система имитационного моделирования динамических автоматных сетей // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 107–120. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-107-120.

For citation:

Tsarev I.V. Sistema imitatsionnogo modelirovaniya dinamicheskikh avtomatnykh setei [A system for simulation modeling of dynamic automata networks]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 107–120. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-107-120.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 121–134

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 121–134

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.93.12 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-121-134

Сравнительное исследование методов классификации в стегоанализе цифровых изображений*

О.О. ШУМСКАЯ[a], В.Ю. БУДКОВ[b]

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

[a] *shumskaya.oo@gmail.com* [b] *visharmail@gmail.com*

Цифровые изображения – графики, схемы, модели, чертежи, фотографии, логотипы и прочее – встречаются ежедневно во всех сферах деятельности человека. Ежедневно в сети Интернет миллионы людей обмениваются изображениями, не подозревая о возможном секретном содержимом, скрытом в файле от человеческого глаза. Стеганография – наука о способах передачи и хранения информации, обеспечивающих сокрытие наличия этой информации в некотором сигнале, предоставляет различные методы сокрытия данных в цифровых изображениях [1].

С целью обнаружения факта наличия секретных вложений в цифровых файлах применяются методы стегоанализа, представляющего собой науку о способах выявления фактов наличия скрытых сообщений в цифровых объектах. Ежегодно появляются новые методы встраивания информации, отличающиеся большей емкостью и незаметностью для человеческого глаза. Однако авторы нечасто приводят исследования по устойчивости метода к стегоанализу. В работах, где встречаются эксперименты по устойчивости к стегоанализу, преимущественно применяется один метод классификации, выбор которого не обоснован экспериментально. Исследование устойчивости перед различными методами стегоанализа и разными классификаторами позволит изучить метод с разных сторон и повысить устойчивость встраивания.

В работе рассмотрены известные работы по стегоанализу с использованием методов машинного обучения. Приведены эксперименты с различными методами классификации и их вариациями с целью их сравнения и выявления подходящих классификаторов.

Ключевые слова: классификатор, методы классификации, информативные признаки, линейный дискриминант Фишера, наивный байесовский классификатор, нейронные сети, AutoMPL, опорные векторы, стегоанализ

* *Статья получена 13 июня 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

В общем случае стегоанализ цифровых объектов рассматривается как задача двухклассовой классификации, когда для каждого анализируемого объекта выбирается один из двух исходов: нет вложения или объект содержит скрытые данные. Так как стеганографическое встраивание секретной информации может осуществляться в пространственную (значения пикселей) и частотную (коэффициенты частотного преобразования, например, дискретного косинусного преобразования, дискретного преобразования Фурье, дискретного вейвлет-преобразования) области цифрового изображения, то и стегоанализ может быть на основе признаков в частотной области, на основе пространственной области или с комбинированным набором признаков.

Полученные в ходе исследования цифрового объекта значения признаков объединяются в вектор, с которым уже работает классификатор.

При стегоанализе важно осуществлять классификацию, учитывая все признаки во взаимодействии, а не по отдельности, так как цифровые объекты, в том числе цифровые изображения, могут сильно разниться по яркости, насыщенности, контрасту, однородности и другим характеристикам. Именно поэтому в стегоанализе нельзя применить классификаторы на основе деревьев: дерево решений предлагает ряд условий, по которым определить, является ли изображение с вложением или «чистым», можно с вероятностью 50 %, что недостаточно для классификации; дерево правил генерирует неоправданно большое множество неемких правил.

Однако существует большое множество методов классификации, которые применимы в области стегоанализа.

Всё чаще встречается в работах классификатор на основе линейного дискриминанта Фишера (ЛДФ) (см., например, [2–5]). Классификатор отличается своей гибкостью относительно количества признаков в наборе, так как весь вектор признаков проецируется на прямую. Идея классификации заключается в поиске лучшего направления данной проекции, которое позволит отнести величину к определенному классу.

В работах [6, 7] в качестве классификатора применяется метод опорных векторов (support vector machine – SVM). В общем случае суть метода заключается в поиске такой прямой, которая позволяет наилучшим образом разделить на классы точки обучающей выборки, размещенные на плоскости. После определения такой прямой все последующие точки классифицируются следующим образом: точки выше прямой относятся к одному классу, ниже прямой – к другому.

С целью максимально возможной эффективности разрабатываемых методов стегоанализа исследователи строят достаточно большие признаковые пространства, включающие десятки и сотни тысяч признаков [7–9]. В пространствах высоких размерностей необходимо рассматривать гиперплоскости – пространства, размерность которых на единицу меньше, чем размерность исходного пространства, что влечет за собой большие объемы вычислений при большом размере набора признаков.

В работе [10] авторы для классификации применяют нейронные сети. Общую схему функционирования сети можно описать следующим образом: набор признаков через входной слой проходит два слоя нейронов, на каждом из которых взвешивается согласно соответствующей слою матрице весов.

Значения на выходе сравниваются с входным набором, выполняется проверка: «узнала» система образ или нет. Если «узнала», то изображение можно отнести к данному классу, если нет – сеть проверяет принадлежность изображения к другому классу, изменяя матрицы весов. Однако на каждом уровне необходимо столько нейронов, сколько признаков в наборе – это может привести к массивным вычислениям в случае больших наборов признаков.

Довольно часто встречается в работах в качестве классификатора наивный байесовский классификатор (НБК), например, в работах [11–13]. Метод заключается в расчете апостериорной вероятности на основе известных из обучения классификатора априорных вероятностей. Так как стегоанализ представляет собой задачу двухклассовой классификации, то при анализе конкретного изображения необходимо рассчитать значения апостериорных вероятностей его принадлежности к каждому из двух рассматриваемых классов – «чистые» изображения и изображения с вложением. Решение принимается на основании сравнения двух рассчитанных вероятностей: объект относится к тому классу, чья апостериорная вероятность больше.

В некоторых работах можно встретить метод стегоанализа с классификатором на основе автоматического многослойного персептрона (AutoMLP) [14, 15]. Этот простой алгоритм, повышающий темп обучения и регулирующий размер нейронных сетей во время обучения, включает идеи генетических алгоритмов и стохастической оптимизации. Суть заключается в поддержании малого числа сетей, которые обучаются параллельно с различными уровнями и различными числами скрытых модулей. После малого постоянного числа временных шагов определяется коэффициент ошибок, и худшие экземпляры заменяются копиями лучших сетей, измененных подобно мутации в генетическом алгоритме.

1. ТЕСТОВАЯ ВЫБОРКА И НАБОР ПРИЗНАКОВ

В качестве тестовой выборки были отобраны 863 полутоновых изображения размером 256*256 из баз изображений UCID (Uncompressed Colour Image Database) [16] и USC-SIPI ID (University of Southern California Signal and Image Processing Institute Image Database) [17]: 411 без вложения (чистые, пустые) и 452 с вложением по одному из распространенных стеганографических методов (Jsteg, PM1, F5).

Отобранные изображения каждого вида были поделены на обучающую и тестовую выборки 65 % (561) и 35 % (302) соответственно.

Так, выбранные методы встраивания информации заключаются в сокрытии информации в частотную область цифрового изображения, и классификация должна быть основана на признаках в частотной области. Для проведения экспериментов подготовлена база значений набора из 14 признаков $\{F_1,\ldots, F_{14}\}$. Три признака на основе энергетических свойств изображения в частотной области [2]:

$$F_1 = \frac{E(f_0)}{E(f_{|\eta|=1})}, \tag{1}$$

где $E(f_0)$ – среднее значение частот нулевых АС-коэффициентов изображения по блокам;

$$F_2 = \frac{\sum_{|\eta|>1} E(f_\eta)}{E(f_{|\eta|=1})}, \tag{2}$$

где $E(f_{|\eta|=1})$ – среднее значение частот тех АС-коэффициента изображения, абсолютная величина которых равна 1;

$$F_3 = \frac{E_{n_{|\eta|>1}}}{E_{n_{|\eta|\le 1}}}, \tag{3}$$

где $E_{n_{|\eta|>1}}$ – энергия тех АС-коэффициентов изображения, абсолютная величина которых > 1.

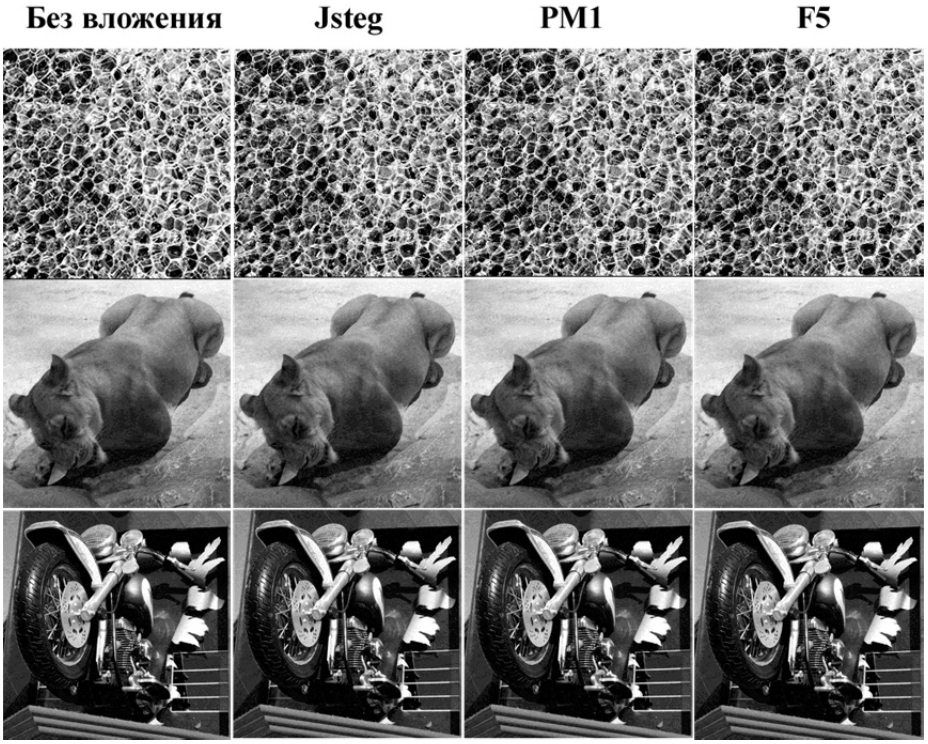


Рис. 1. Примеры изображений в четырех разных состояниях

Fig. 1. Examples of images in four various states

Отмечается, что именно признаки, основанные на соотношениях между энергией, собранной в отдельных частотных ДКП-коэффициентах, концентрируют в себе максимальную информацию о внутреннем содержании изображения.

Стеганографическое встраивание в частотную область осуществляется преимущественно в АС-коэффициенты со значениями по модулю, близкими к нулю. Поэтому двойные гистограммы для коэффициентов со значениями в диапазоне [–5, 5] концентрируют в себе максимальную информацию о вносимых искажениях при встраивании в частотную область.

Двойная гистограмма представляет собой матрицу, которая отражает, на каком месте сколько раз суммарно по всем блокам встретился коэффициент с определенным значением [4, 5]:

$$f_4,\ldots,f_{14}=\frac{\sum_{k=1}^{B}\delta(d,\ d_k(i,j))}{\left\|\sum_{k=1}^{B}\delta(d,\ d_k(i,j))\right\|_{L_1}}, \tag{4}$$

где d – фиксированное значение коэффициента, $d \in [-5,\ 5]$; B – количество блоков в изображении; i, j – координаты положения коэффициента в блоке, $\delta(u,v)=\begin{cases}1, u=v,\\ 0,\ else,\end{cases}$ L_1 – норма, максимальная из сумм элементов по столбцам.

Каждую характеристику авторы рассчитывают дважды: для исследуемого изображения (J_1) и для изображения, которое получают путем обрезания исследуемого изображения сверху и слева на 4 пикселя (J_2) (рис. 2). Подобное действие авторы объясняют следующим образом: при обрезании изображения слева и сверху разделение изображения на блоки сдвигается, коэффициенты дискретного косинусного преобразования освобождаются от влияния прошлой квантизации и содержат только статистические данные изображения, которые как раз важны при стегоанализе.

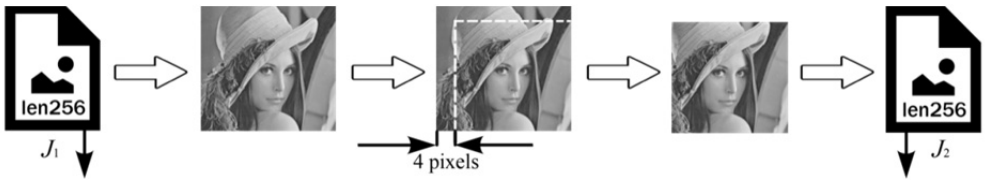


Рис. 2. Исследуемое изображение J_1 и изображение J_2, полученное путем обрезания изображения J_1

Fig. 2. The image under study J_1 and the image J_2 received by cropping the image J_1

Таким образом, конечным значением признака будет значение функционала

$$F_4\ldots F_{14}=\|f_4\ldots f_{14}(J_1)-f_4\ldots f_{14}(J_2)\|_{L_1}. \tag{5}$$

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ МЕТОДА ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

Метод опорных векторов имеет множество настраиваемых параметров, однако регулирование осуществляется выбором типа функции ядра. В зависимости от того, как распределены классифицируемые объекты в пространстве, применяют метод опорных векторов с той или иной функцией ядра. Функция ядра определяет, каким образом классы будут условно разделяться в пространстве: линией, окружностями, кривой или с применением предварительной обработки данных, например, дисперсионного анализа.

Таблица 1

Table 1

Вариации метода опорных векторов

Variations of the support vector method

Функция ядра	Классификация	Подача		Точность класса
		с вложением	без вложения	
Точечная	с вложением	121	76	61,42 %
	без вложения	37	68	64,76 %
	отзыв класса	76,58 %	47,22 %	**62,58 %**
Радиальная	с вложением	122	66	64,89 %
	без вложения	36	78	68,42 %
	отзыв класса	77,22 %	54,17 %	**66,23 %**
Полиномиальная	с вложением	140	97	59,07 %
	без вложения	18	47	72,31 %
	отзыв класса	88,61 %	32,64 %	**61,92 %**
Нейронная	с вложением	106	75	58,56 %
	без вложения	52	69	57,02 %
	отзыв класса	67,09 %	47,92 %	**57,96 %**
На основе дисперсионного анализа	с вложением	122	64	65,59 %
	без вложения	36	80	68,97 %
	отзыв класса	77,22 %	55,56 %	**66,89 %**
Епачечникова	с вложением	113	69	62,09 %
	без вложения	45	75	62,50 %
	отзыв класса	71,52 %	52,08 %	**62,25 %**

Метод опорных векторов на основе дисперсионного анализа показал лучший результат среди вариаций – 66,89 %. Метод заключается в предварительной обработке классифицируемых данных с помощью дисперсионного анализа – выставление весов важности каждому объекту в выборке. Элементы с наибольшими весами принимаются за эталонные, и классификатор разделяет оставшиеся элементы выборки по классам на основе эталонных элементов [18].

3. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

У метода на основе нейронных сетей есть три настраиваемых параметра, которые влияют на работу классифкатора:

1) количество тренировочных кругов (стандартно 500);
2) изменение весов на каждом шаге (стандартно на 0,3);
3) импульс (стандартно 0,2).

Таблица 2

Table 2

Эксперименты для нейронных сетей с разными вариантами набора параметров

Experiments for neural networks with various sets of parameters

Параметры	Классификация	Подача		Точность класса
		с вложением	без вложения	
500 0,3 0,2	с вложением	128	70	64,65 %
	без вложения	30	74	71,15 %
	отзыв класса	81,01 %	51,39 %	**66,89 %**
500 0,4 0,2	с вложением	126	65	65,97 %
	без вложения	32	79	71,17 %
	отзыв класса	79,75 %	54,86 %	**67,88 %**
500 0,4-0,5 0,2	с вложением	126	67	65,28 %
	без вложения	32	77	70,64 %
	отзыв класса	79,75 %	53,47 %	**67,22 %**
500-600-700 0,5 0,3	с вложением	131	72	64,53 %
	без вложения	27	72	72,73 %
	отзыв класса	82,91 %	50,00 %	**67,22 %**
400 0,5 0,3	с вложением	129	64	66,84 %
	без вложения	29	80	73,39 %
	отзыв класса	81,65 %	55,56 %	**69,21 %**

Из приведенных результатов вычислительных экспериментов (табл. 2) видно, что лучшую точность классификации (69,21 %) показал набор признаков:

1) количество тренировочных кругов – 400;
2) изменение весов на каждом шаге – 0,5;
3) импульс – 0,3.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА AUTOMPL

У метода AutoMPL есть три параметра, обусловливающих процесс обучения классификатора:

1) S – количество тренировочных кругов (стандартно 10);
2) G – количество поколений для обучения (стандартно 10);
3) E – количество тренировочных ансамблей нейронных сетей, обучающихся параллельно (стандартно 4).

Таблица 3

Table 3

Эксперименты для AutoMPL с разными вариантами набора параметров

Experiments for AutoMPL with various sets of parameters

Параметры	Классификация	Подача		Точность класса
		с вложением	без вложения	
10 10 4	с вложением	132	72	64,71 %
	без вложения	26	72	73,47 %
	отзыв класса	83,54 %	50,00 %	**67,55 %**
20 20 4	с вложением	119	52	69,59 %
	без вложения	39	92	70,23 %
	отзыв класса	75,32 %	63,89 %	**69,87 %**
15 15 4	с вложением	151	99	60,40 %
	без вложения	7	45	86,54 %
	отзыв класса	95,57 %	31,25 %	**64,90 %**
10 10 7	с вложением	113	63	64,20 %
	без вложения	45	81	64,29 %
	отзыв класса	71,52 %	56,25 %	**64,24 %**
20 20 7	с вложением	144	90	61,54 %
	без вложения	14	54	79,41 %
	отзыв класса	91,14 %	37,50 %	**65,56 %**
15 15 7	с вложением	149	99	60,08 %
	без вложения	9	45	83,33 %
	отзыв класса	94,30 %	31,25 %	**64,24 %**

По результатам экспериментов (табл. 3) наибольшую точность классификации (69,87 %) показал набор признаков:

1) количество тренировочных кругов – 20;

2) количество поколений для обучения – 20;

3) количество тренировочных ансамблей нейронных сетей, обучающихся параллельно, – 4.

Однако стоит заметить, что AutoMLP показывает высокую точность обнаружения изображений с вложением (95,57 % при наборе значений параметров {15, 15, 4}), но из-за низкой точности обнаружения чистых изображений общая точность неконкурентоспособна.

5. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Сравнительные эксперименты были проведены с каждым методом с соответствующими выбранными параметрами (табл. 4). Для полного анализа была рассчитана общая точность методов (табл. 5). Результаты применения методов классификации к подготовленному набору изображений представлены ниже.

Таблица 4

Table 4

Результаты классификации

Classification results

Классификация	Подача		Точность класса
	с вложением	без вложения	
AutoMLP {20; 20; 4}			
С вложением	119	52	69,59 %
Без вложения	39	92	70,23 %
Отзыв класса	75,32 %	63,89 %	
НБК			
С вложением	113	57	66,47 %
Без вложения	45	87	65,91 %
Отзыв класса	71,52 %	60,42 %	
Нейронные сети {400; 0,5; 0,3}			
С вложением	129	64	66,84 %
Без вложения	29	80	73,39 %
Отзыв класса	81,65 %	55,56 %	
ЛДФ			
С вложением	126	58	68,48 %
Без вложения	32	86	72,88 %
Отзыв класса	79,75 %	59,72 %	
SVM – Anova			
С вложением	122	64	65,59 %
Без вложения	36	80	68,97 %
Отзыв класса	77,22 %	55,56 %	

Таблица 5

Table 5

Точность методов

Accuracy of the methods

AutoMLP	НБК	Нейронные сети	ЛДФ	SVM
69,87 %	66,23 %	69,21 %	70,20 %	66,89 %

Стоит сразу отметить, что в рассматриваемой области начальной гипотезой принимается то, что изображение содержит некоторое секретное вложение, поэтому его и проверяют. Вследствие этого ошибкой первого рода является классификация изображения с вложением в класс изображений без вложения, а ошибка второго рода – классификация «чистого» изображения в класс изображений с вложением. В стегоанализе ошибка первого рода (пропуск изображения с вложением как пустого) является опаснее, нежели перепроверка или попытка извлечения данных из пустого изображения. Это немаловажный фактор, влияющий на выбор метода классификации.

Вычислительные эксперименты показали, что в общем случае точность рассматриваемых классификаторов разнится максимум на 5 % (между ЛДФ и НБК). Стоит отметить, что НБК является наиболее простым алгоритмом для реализации и минимальным по объемам вычислений. Однако, помимо того, что у него минимальная общая точность среди всех методов, так и точность классификации изображений с вложением наименьшая среди методов.

Общая точность методов (см. табл. 5) показывает, что для рассматриваемого случая наиболее подходящие методы – это ЛДФ, AutoMLP и нейронные сети (разница между общими точностями < 1 %). По точности обнаружения изображений без вложения AutoMLP имеет преимущество перед нейронными сетями на 8,33 % и перед ЛДФ на 4,72 %. По точности обнаружения изображений с вложением нейронные сети имеют преимущество перед AutoMLP на 6,33 % и перед ЛДФ на 1,9 %.

Среди рассмотренных вариантов можно было бы выбрать средний вариант – ЛДФ, однако с поправкой на стремление уменьшить ошибку первого рода, т. е. увеличить вероятность обнаружения изображений с вложением, наиболее подходящим методом оказывается метод на основе нейронных сетей.

Также замечено, что при увеличении базы записей точность методов повышается, так как учитывается больше различных вариантов изображений (контрастность, структура, количество мелких деталей, однородность, область и объем встраивания).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показали, что одностороннее рассмотрение стеганографического алгоритма приводит к снижению показателя устойчивости перед стегоаналитическими методами.

В работе были рассмотрены наиболее популярные методы классификации, такие как наивный байесовский классификатор, линейный дискриминант Фишера, метод опорных векторов, AutoMPL, нейронные сети. Проведены эксперименты с различными вариациями методов SVM, AutoMPL и нейронных сетей с целью выявления оптимальных параметров методов для лучшей точности классификации.

Проведены сравнительные вычислительные эксперименты со всеми методами для выявления наиболее действенной методики выявления вложений в стегоизображениях.

При рассмотрении вариаций метода AutoMLP отмечалось, что метод показывает очень высокую точность обнаружения изображений с вложением (более 95 %) при определенных значениях параметров. Таким образом, в спорных ситуациях или при наличии сомнения в решении можно воспользоваться следующим:

1) дополнительной проверкой с помощью метода AutoMLP, варьируя значения параметров в зависимости от рассматриваемой ситуации и конкретного вопроса;

2) комбинацией двух методов классификации, например, AutoMLP с его точностью обнаружения чистых изображений (бóльшая среди рассмотренных

методов) и метода на основе нейронных сетей с его высокой точностью обнаружения изображений с вложением, определив веса каждому методу.

Полученные результаты применимы не только в стегоанализе для выявления вложений, но также и в стеганографии для построения целевых функций, позволяющих осуществлять адаптивное встраивание секретной информации с минимизацией вносимых искажений в информативные признаки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коханович Г.Ф., Пузыренко А.Ю.* Компьютерная стеганография: теория и практика. – Киев: МК-Пресс, 2006. – 288 с.

2. A steganalysis method in the DCT domain / M. Jia-Fa, N. XinXin, X. Gang, Sh. Wei-Guo, Zh. Na-Na // Multimedia Tools and Applications. – 2016. – N 75 (10). – P. 5999–6019.

3. *Шумская О.О.* Метод стегоанализа JPEG-изображений на основе энергетических признаков в частотной области // Научная сессия ТУСУР-2017: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2017. – Ч. 6. – С. 41–44.

4. *Fridrich J.* Feature-based steganalysis for JPEG images and its Implications for future design of steganographic schemes // Information Hiding: 6th International Workshop, IH 2004. – Toronto, 2004. – P. 67–81. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 3200).

5. Alpha-trimmed image estimation for JPEG steganography detection / M.-C. Chen, S.S. Agaian, C.L.P. Chen, B.M. Rodriguez // 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. – San Antonio, Texas, USA, 2009. – P. 4581–4585.

6. Steganalysis of LSB matching using differences between nonadjacent pixels / Zh. Xia, X. Wang, X. Sun, Q. Liu, N. Xiong // Multimedia Tools and Applications. – 2016. – Vol. 75 (4). – P. 1947–1962.

7. *Fusheng Y., Gao T.* Novel image splicing forensic algorithm based on generalized DCT coefficient-pair histogram // Proceedings of 10th Chinese Conference (IGTA 2015). – Beijing, China, 2015. – P. 63–71.

8. An improved approach to steganalysis of JPEG images / Q. Liu, A. Sung, M. Qiao, Z. Chen, B. Ribeiro // Information Sciences. – 2010. – Vol. 180 (9). – P. 1643–1655.

9 *Kodovsky J., Fridrich J.* Steganalysis of JPEG images using rich models // Proceedings of SPIE, Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics XIV. – San Francisco, USA, 2012. – P. 7–20.

10. *Zong H., Liu X., Luo X.* Blind image steganalysis based on wavelet coefficient correlation // Digital Investigation. – 2012. – Vol. 9. – P. 58–68.

11. Searching for hidden messages: automatic detection of steganography / G. Berg, I. Davidson, M.-Y. Duan, G. Paul // Proceedings of the 15th Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference, August 12–14, 2003. – Acapulco, Mexico, 2003. – P. 51–56.

12. New results on generalization of roos-type biases and related keystream of RC4 / S. Maitra, G. Paul, S. Sarkar, M. Lehmann, W. Meier // Progress in Cryptology – AFRICACRYPT 2013: 6th International Conference on Cryptology in Africa: proceedings. – Cairo, Egypt, 2013. – P. 222–239. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 7918).

13. *Евсютин О.О., Мещеряков Р.В., Шумская О.О.* Стегоанализ цифровых изображений с использованием наивного байесовского классификатора // Материалы 10 Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2017). – Ростов н/Д.: ЮФУ, 2017. – С. 56–58.

14. Steganalysis and payload estimation of embedding in pixel differences using neural networks / V. Sabeti, Sh. Samavi, M. Mahdavi, Sh. Shirani // Pattern Recognition. – 2010. – Vol. 43 (1). – P. 405–415.

15. *Lubenko I., Ker A.D.* Steganalysis with mismatched covers: do simple classifiers help? // MM&Sec '12: proceedings of the 14th ACM Multimedia and Security Workshop, September 6–7, 2012. – New York, NY: ASM, 2012. – P. 11–18.

16. Image Databases [Electronic recourse] // ImageProcessingPlace.com. – URL: http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm (accessed: 14.09.2018).

17 The USC-SIPI Image Database [Electronic recourse] // USC University of Southern California. – Los Angeles, CA, 2017. – URL: http://sipi.usc.edu/database (accessed: 14.09.2018).

18. *Bharathi A., Natarajan A.M.* Cancer classification using support vector machines and relevance vector machine based on analysis of variance features // Journal of Computer Science. – 2011. – Vol. 7 (9). – P. 1393–1399.

Шумская Ольга Олеговна, младший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. E-mail: shumskaya.oo@gmail.com

Будков Виктор Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. E-mail: shumskaya.oo@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-121-134

Comparative study of classification methods in the stegoanalysis of digital images[*]

O.O. SHUMSKAYA[a], *V.Y. BUDKOV*[b]

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 39, 14th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation

[a] *shumskaya.oo@gmail.com* [b] *visharmail@gmail.com*

Abstract

Everyone can see digital images – schedules, schemes, models, drawings, photos, logos and others – daily in all fields of human activity. Millions of people exchange images with each other in the Internet daily, without suspecting possible confidential contents hidden from a human eye in the file. Steganography is a science about the ways of transfer and storage of information which provide hiding the availability of this information in some signal. It provides various methods of concealment of data in digital images [1].

Methods of steganalysis which is a science about the ways of identification of the availability of hidden messages in digital objects are applied to reveal the availability of confidential information in digital files. Annually new methods of information embedding characterized by a bigger capacity and invisibility for a human eye are developed. However, the authors infrequently do research on the method tolerance to steganalysis. In papers where experiments on tolerance to steganalysis are described, one classification method is mainly applied, whose choice isn't validated experimentally. The research on the tpolerance as compared with various steganalysis methods and various qualifiers will allow studying a steganographic method from different perspectives and will help to increase embedding stability.

Well-known works on steganalysis based on machine learning methods are considered in the paper. Experiments on comparing various methods of classification and their variations to identify appropriate qualifiers are also described.

[*] *Received 13 June 2018.*

Keywords: qualifier, classification methods, informative features, Fisher linear discriminant, naive Bayesian qualifier, neural nets, AutoMPL, support vectors, steganalysis

REFERENCES

1. Kokhanovich G.F., Puzyrenko A.Yu. *Komp'yuternaya steganografiya: teoriya i praktika* [Computer steganography: theory and practice]. Kiev, MK-Press Publ., 2006. 288 p.

2. Jia-Fa M., XinXin N., Gang X., Wei-Guo Sh., Na-Na Zh. A steganalysis method in the DCT domain. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, no. 75 (10), pp. 5999–6019.

3. Shumskaya O.O. [Method of JPEG-images steganalysis on the basis of energy features in the frequency domain]. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2017*: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Proceedings of the international scientific-technical conference of students, graduate students and young scientists "Scientific session TSUCSR-2017"]. Tomsk, 2017, pt. 6, pp. 41–44. (In Russian).

4. *Fridrich J.* Feature-based steganalysis for JPEG images and its Implications for future design of steganographic schemes. *Information Hiding: 6th International Workshop, IH 2004*, Toronto, 2004, pp. 67–81.

5. Chen M.-C., Agaian S.S., Chen C.L.P., Rodriguez B.M. Alpha-trimmed image estimation for JPEG steganography detection. *2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Antonio, Texas, USA, 2009, pp. 4581–4585.

6. Xia Zh., Wang X., Sun X., Liu Q., Xiong N. Steganalysis of LSB matching using differences between nonadjacent pixels. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, vol. 75 (4), pp. 1947–1962.

7. Fusheng Y., Gao T. Novel image splicing forensic algorithm based on generalized DCT coefficient-pair histogram. *Proceedings of 10th Chinese Conference (IGTA 2015)*, Beijing, China, 2015, pp. 63–71.

8. Liu Q., Sung A., Qiao M., Chen Z., Ribeiro B. An improved approach to steganalysis of JPEG images. *Information Sciences*, 2010, vol. 180 (9), pp. 1643–1655.

9 Kodovsky J., Fridrich J. Steganalysis of JPEG images using rich models. *Proceedings of SPIE, Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics XIV*, San Francisco, USA, 2012, pp. 7–20.

10. Zong H., Liu X., Luo X. Blind image steganalysis based on wavelet coefficient correlation. *Digital Investigation*, 2012, vol. 9, pp. 58–68.

11. Berg G., Davidson I., Duan M.-Y., Paul G. Searching for hidden messages: automatic detection of steganography. *Proceedings of the 15th Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference*, August 12– 14, 2003, Acapulco, Mexico, pp. 51–56.

12. Maitra S., Paul G., Sarkar S.,Lehmann M., Meier W. New results on generalization of roos-type biases and related keystream of RC4. *Progress in Cryptology – AFRICACRYPT 2013: 6th International Conference on Cryptology in Africa: proceedings*, Cairo, Egypt, 2013, pp. 222–239.

13. Evsyutin O.O., Meshcheryakov R.V., Shumskaya O.O. [Steganalysis of digital images with use of the naive Bayesian qualifier]. *Materialy 10-i Vserossiiskoi mul'tikonferentsii po problemam upravleniya (MKPU-2017)* [Proceedings of the 10-th All-Russian multiconference on problems of management (MCPM-2017)]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2017, pp. 56–58. (In Russian).

14. Sabeti V., Samavi Sh., Mahdavi M., Shirani Sh. Steganalysis and payload estimation of embedding in pixel differences using neural networks. *Pattern Recognition*, 2010, vol. 43 (1), pp. 405–415.

15. Lubenko I., Ker A.D. Steganalysis with mismatched covers: do simple classifiers help? *MM&Sec '12: proceedings of the 14th ACM Multimedia and Security Workshop*, September 6–7, 2012. New York, NY, ASM, 2012, pp. 11–18.

16. Image Databases. *ImageProcessingPlace.com*. Available at: http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm (accessed 14.09.2018).

17 The USC-SIPI Image Database. *USC University of Southern California*. Los Angeles, CA, 2017. Available at: http://sipi.usc.edu/database (accessed 14.09.2018).

18. Bharathi A., Natarajan A.M. Cancer classification using support vector machines and relevance vector machine based on analysis of variance features. *Journal of Computer Science*, 2011, vol. 7 (9), pp. 1393–1399.

Для цитирования:

Шумская О.О., Будков В.Ю. Сравнительное исследование методов классификации в стегоанализе цифровых изображений // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 121–134. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-121-134.

For citation:

Shumskaya O.O., Budkov V.Yu. Sravnitel'noe issledovanie metodov klassifikatsii v stegoanalize tsifrovykh izobrazhenii [Comparative study of classification methods in the stegoanalysis of digital images]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 121–134. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-121-134.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 135–144

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 135–144

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASUREMENT DEVICES AND SYSTEMS

УДК 62-529, 681.2.084 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-135-144

Модернизация ртутного поромера AutoPore III*

А.Д. ЗАИКИН

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

zaikin@pitf.ftf.nstu.ru

Описан опыт модернизации специализированного прибора – ртутного интрузионного поромера AutoPore III 9420. Сохранившаяся после длительной эксплуатации в рабочем состоянии механическая и гидравлическая часть поромера и устаревший физически и морально блок управления определили направление и способ такой модернизации. Плата контроллера прибора, разработанная под устаревшую системную шину ISA, не позволяла решить проблему простой заменой компьютера на современный. Самым узким местом в штатном управляющем блоке оказались магнитные носители как HDD, так и FDD. Использование специального IDE адаптера позволило заменить оба носителя на CF-карту, совместившую их функции. Управляющая программа, работающая под DOS, использует недокументированные возможности операционной системы, что налагает определенные ограничения на конфигурацию. Реализованное техническое решение позволило накапливать результаты измерений на CF-карте и в то же время использовать ее для переноса данных.

Наличие резервной платы контроллера позволило применить также другой вариант модернизации. Дублирующий управляющий блок был собран на основе материнской платы, содержащей ISA и PCI слоты. В этом варианте CF-карта используется как несъемный диск. Контроллер USB для PCI слота был использован для переноса данных посредством флеш-накопителя. Последовательное использование режимов «управление–перенос» достигается в режиме мультизагрузки.

Написана программа, позволяющая преобразовать протокол работы поромера AutoPore III, содержащий кривую интрузии ртути и расчет параметров порового пространства на основе модели цилиндрических пор, в файл формата, приемлемого для импорта в современную специализированную программу обработки результатов измерений поромера AutoPore V. Последняя, позволяя по кривой интрузии рассчитать проницаемость образца и извилистость пор, гранулометрический состав и отношение диаметров полости и устья поры, фрактальную размерность поровой поверхности, существенно расширяет информационную ценность анализа.

Ключевые слова: ртутный поромер, AutoPore III, модернизация, контроллер, CF-карта, управляющая программа, интерфейсная шина, импорт данных

* *Статья получена 05 мая 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие российские исследовательские лаборатории, независимо от ведомственной принадлежности, используют устаревшее научное оборудование. Средний возраст научного оборудования в России составляет 15 лет, при том что предельный срок эксплуатации научного оборудования во всем мире составляет 11 лет [1]. Ряд причин, и прежде всего экономических, не позволяет своевременно провести полноценное обновление приборного парка. Устаревая морально и физически, часто прибор остается вполне работоспособным, поскольку в конструкцию 10–20 лет назад был заложен высокий потенциал, а качество изготовления продолжает обеспечивать надежные эксплуатационные характеристики.

Процесс устаревания сложного приборного комплекса идет неравномерно: какие-то узлы (например, точная механика и оптика) могут не уступать современным аналогам, что, в принципе, позволяет использовать его в исследовательских целях и в настоящее время. Часто такой прибор не имеет сопряжения с компьютером, и регистрация измерений происходит в аналоговой форме. Возможен вариант, когда такое сопряжение присутствует, но в современных условиях выглядит архаично, что несомненно является обратной стороной опережающего развития компьютерных технологий.

Модернизация таких приборов вполне оправданна. Примеры модернизации, заключающейся в оснащении прибора цифровым регистратором, изначально не предусмотренным конструкцией, приведены в [2–7]. В [8] описан способ модернизации цифрового регистрирующего блока спектрометра. В настоящей работе излагается опыт модернизации цифрового блока управления ртутного интрузионного поромера AutoPore III 9420.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В петрофизической лаборатории ОАО «Сибнефтегеофизика» научно-исследовательская лаборатория «Сиб-Меркурий» с 1995 года по настоящее время для исследования структуры порового пространства горных и осадочных пород, а также других материалов, таких как катализаторы, адсорбенты, фильтры, наполнители, композитные материалы, использует ртутный интрузионный поромер AutoPore III 9420 производства Micromeritics Instrument Corporation, USA.

Данное высокотехнологичное оборудование в свое время активно закупалось и внедрялось в исследовательских подразделениях различной научной направленности. Отметим, что аналогичные приборы в РФ не производятся. Результаты научных исследований, полученные с использованием ртутной порометрии, широко представлены в научной литературе, примеры можно найти в работах [9–11].

Метод ртутной порометрии [12–13] основан на контролируемой интрузии ртути в пористую структуру исследуемого образца. Ртуть, не смачивающая поверхность твердого тела (редкие исключения можно не брать в расчет), проникает в его поры лишь под воздействием приложенного внешнего давления. Измеряя объем ртути, внедренной в поры, и определяя его как функцию внешнего давления, можно получить информацию о распределении пор по разме-

рам. Ступенчато увеличивая давление по заданному алгоритму, интрузионный поромер AutoPore III 9420 может достигать давления в 400 МПа. Такое высокое давление дает возможность исследовать поры радиусом до 1,5 нм.

Управление прибором осуществляется компьютером, который обеспечивает работу вакуумной системы, систем генерации низкого и высокого давления. Подавая команды на насосы и сервоклапаны, снимая показания с датчиков, программа управления проводит регистрацию давления и объема вдавленной ртути, автоматическую коррекцию сжимаемости ртути и объема образца. Также управляющая программа сохраняет полученную информацию, формирует базу данных измерений, генерирует отчет о проделанной работе, обеспечивает печать отчета по стандартизированным формам.

Ртуть, являясь токсичным веществом, отнесена к I классу опасности, поэтому в соответствии с требованиями техники безопасности компоненты прибора, непосредственно осуществляющие контакт с открытой ртутью, размещаются в специализированном помещении. Управляющий комплекс находится в помещении, к которому не предъявляются столь высокие требования по безопасности. Панорамное окно между помещениями позволяет оператору контролировать работу поромера визуально.

Несмотря на длительный срок эксплуатации ртутного поромера, механическая составляющая прибора находится в рабочем состоянии и пригодна для дальнейшей эксплуатации. Управляющий же комплекс, не продемонстрировав такой надежности, неоднократно подвергался текущему ремонту.

Сбой работы управляющего комплекса приводит к тому, что анализ, стоимость которого высока, становится испорченным. Неработоспособность прибора из-за выхода из строя устаревших комплектующих приводит к нарушению программы исследований. Метод ртутной порометрии относится к методам разрушающего контроля, и сбой в работе прибора – это не только потеря времени персонала и финансовая потеря, но и потеря нередко уникального объекта исследования.

Частые выходы из строя управляющего комплекса, длительные простои оборудования, устаревшего как морально, так и физически, поставили вопрос о его комплексной модернизации.

2. ОПИСАНИЕ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ПОРОМЕРА

Блок управления ртутного поромера AutoPore III 9420 включает в себя IBM PC-совместимый компьютер, плату специализированного контроллера и управляющую программу. Характеристики компьютера следующие: системный блок производства 1993 года, AST Bravo LC 4/66d; на материнской плате 202688-101X5 расположен процессор 80486DX2, две планки оперативной памяти – суммарно 8 Мб, четыре слота ISA шины, контроллер первичного (Primary) канала IDE, контроллер FDD; базовая система ввода-вывода – AST, жесткий IDE диск емкостью 270 Мб, флоппи-дисковод 3.5".

Плата контроллера поромера разработана под системную шину ISA в своей первой 8-разрядной реализации. Информационная шина, обеспечивающая коммутацию прибора и компьютера, реализована плоским 50-жильным кабелем FRC-50. Контроллер и система управляющих команд являются оригинальной разработкой Micromeritics Instrument Corp и не документированы.

Управляющая программа функционирует под MS-DOS 6.22. Разработчики прибора в полной мере использовали возможности, предоставляемые операционной системой для взаимодействия с аппаратными средствами напрямую. Как известно, такие решения, повышая эффективность, таят в себе подводные камни, которые приводят к коллизиям при изменении оборудования. Так, работа управляющей программы невозможна при загрузке сторонних резидентных программ и драйверов. Критичным является даже присутствие драйвера русификации клавиатуры. Система, программа и данные измерений хранятся на жестком диске с IDE интерфейсом, и этот диск обязательно должен быть определен как Primary IDE Master.

Процесс загрузки операционной системы заканчивается загрузкой управляющей программы поромера. Разработчик положил, что эксплуатация компьютера осуществляется только в специализированном режиме управления поромером.

По результатам анализа управляющая программа формирует файл отчета, так называемую порограмму, которая представляет собой простой текстовый файл, в формате ASCII. На жестком диске формируется локальная база данных, содержащая порограммы. Также порограмму можно либо напечатать на принтере, опционно подключаемом к компьютеру, либо, сохранив на 3.5" флоппи-диске, передать для дальнейшей обработки и использования.

Невозможность использования драйвера русификации клавиатуры заставляет применять методы транслитерации для описания характеристик исследуемого образца, создания паспорта измерения.

Использование дискет для хранения и передачи информации, конечно, выглядит анахронизмом. Массовое производство дискет практически прекращено еще 2010 году. В настоящее время абсолютное большинство выпускающихся материнских плат для персональных компьютеров вообще не содержит разъема для подключения дисковода. И флоппи-диски, и дисководы для них быстро утрачивали работоспособность.

Контроллер IDE, используемый для подключения HDD, является устаревшим и не используется на современных материнских платах. Жесткий диск в процессе эксплуатации ртутного поромера неоднократно выходил из строя и требовал замены.

Созданная в конце 1980-х операционная система MS-DOS для работы с жестким диском использует функцию BIOS Int 13h. Принятые принципы адресации блоков приводят к ограничению на допустимое число: цилиндров – 1024, головок – 16, секторов – 63. При установленном размере сектора в 512 байт это приводит к общему ограничению на размер диска в 504 Мб [14, 15].

Потому современные жесткие диски, даже имеющие нужный IDE интерфейс, но обладающие большой емкостью, не подходят в качестве замены. Устаревший AST BIOS материнской платы их просто не определяет. Приходилось использовать бывшие в употреблении жесткие диски, уже имеющие длительные сроки эксплуатации, которые, в свою очередь, ненадежны и дефицитны.

3. МОДЕРНИЗАЦИИ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ. ВАРИАНТ 1

Для решения рассматриваемой задачи было решено модернизировать существующий системный блок, отказавшись от использования HDD и FDD как наиболее узких и проблемных мест комплекса.

В качестве экономичного варианта твердотельного накопителя было решено использовать карту высокоскоростной памяти Transcend 133X CF емкостью 2 Гб; 40-контактный IDE-адаптер позволяет использовать CompactFlash (CF) карты как обычный IDE жесткий диск. Данному носителю присущи определенные достоинства: быстрый доступ и низкое энергопотребление, отсутствие акустического шума, ударопрочность.

Форм-фактор позволяет закрепить IDE-адаптер в корпусе компьютера так, что карту в его слот можно вставлять со стороны фронтальной плоскости системного блока. Работа с IDE-адаптером становится похожей на работу со встроенным карт-ридером. Легкий доступ к карте позволяет использовать ее не только в качестве жесткого диска, но и в качестве сменного носителя информации. Сохранив ртутную порограмму на CF-карте, можно перенести ее для дальнейшей обработки и хранения на другой компьютер. Требуется только, чтобы принимающий компьютер был оснащен карт-ридером, поддерживающим формат CF-карт. Таким образом, потребность в использовании в процессе работы ненадежных и устаревших FDD отпадает.

Известные ограничения BIOS, IDE и ОС на объем винчестеров не позволяют использовать «большие» диски на старых платах. AST BIOS компьютера опознает CF-карту со следующими атрибутами: цилиндров 1024, головок 16, секторов 63. На карте системными средствами создавался основной раздел DOS объемом 504 Мб. Важно отметить, что CF-карта становится загрузочной, только если переопределить основную загрузочную запись с помощью системной утилиты FDISK с параметром MBR.

Основной раздел форматировался под файловую систему FAT16. На него устанавливались операционная система MS-DOS 6.22, конфигурационные файлы и управляющая программа поромера.

В оставшейся части карты формировался расширенный раздел DOS, в котором располагалось три логических диска. Однако эти действия носили факультативный характер, поскольку не влияли на работоспособность управляющего блока.

4. МОДЕРНИЗАЦИИ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ. ВАРИАНТ 2

Несмотря на то что материнская плата, поставленная с ртутным поромером, продолжает работать без сбоев, нельзя исключить выход ее из строя. Поэтому было принято решение не ограничиваться описанным выше вариантом модернизации, а дополнительно собрать дублирующий системный блок. Плата контроллера, оставшаяся после списания и демонтажа аналогичного ртутного поромера и попавшая в разряд резервных, позволяла надеяться на реализацию и такого варианта.

Материнская плата J-656HXA используемого для этих целей системного блока имеет сокет под процессор Pentium, но главная ее особенность – наличие на плате трех 32-bit PCI-слотов и двух ISA-слотов.

Такой набор позволил реализовать иную схему работы управляющего блока. Как отмечалось выше, для контроллера поромера необходим ISA-слот. Наличие же на материнской плате PCI-слота позволило, применив контроллер USB Orient NC-612, 4xUSB 2.0, USB 2.0, PCI, добавить в систему USB-порты. Правда, операционная система MS-DOS не поддерживает это оборудование, однако драйвер usbaspi.sys от компании Panasonic позволяет операционной системе

видеть подключенный к USB-порту USB-накопитель как устройство SCSI. Данный драйвер корректно сканирует USB-контроллеры на материнской плате, находит все устройства, к ним подключенные, поддерживает интерфейс USB 2.0. Использование драйвера di1000dd.sys от компании Novac позволяет включить поддержку файловой системы FAT32 для USB-накопителя.

Традиционно материнская плата имеет два канала IDE-контроллера – первичный (primary) и вторичный (secondary), каждый из которых представляет собой, по сути, отдельный контроллер. Каждый канал имеет собственный разъем на материнской плате и отдельный шлейф. Использование материнских плат с двумя IDE-контроллерами показало, что работоспособность управляющей программы поромера сохраняется лишь при условии, что загрузочный HDD-диск подключен как Primary IDE Master, а вторичный (Secondary) канал свободен. Видимо, это связано с использованием при написании программы недокументированных возможностей. В этом варианте модернизации в качестве системного диска можно использовать как HDD-, так и CF-карту, главное, чтобы устройство распознавал BIOS материнской платы.

Операционная система MS-DOS 6.22 позволяет реализовать многовариантный режим загрузки. Для этого в конфигурационном файле CONFIG.SYS используется секция [MENU]. Были прописаны два варианта загрузки.

Первый, используемый по умолчанию, загружает чистый DOS и управляющую программу прибора. В этом режиме компьютер служит управляющим устройством ртутного поромера.

Второй вариант, а он может быть выбран оператором в процессе загрузки, включает в себя загрузку драйверов USB-контроллера, русификатора клавиатуры и т. п. В этом режиме компьютер используется как общесистемный, прежде всего для копирования результатов измерений ртутного поромера на USB-накопитель с последующей обработкой их в специализированных программах.

Оба варианта модернизации были реализованы практически, проверены в работе и запущены в эксплуатацию.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Отчет (порограмма), формируемый управляющей программой ртутного поромера AutoPore III, представляет собой ASCII-файл, содержащий заголовок с описанием характеристик исследуемого образца и таблицу с данными. Таблица кроме кривой интрузии содержит диаметр, объем и площадь поверхности пор, рассчитанные исходя из предложенной Уошбурном [16] модели цилиндрических пор. Вместе с тем в настоящее время существуют иные, более сложные модели порового пространства и описания процессов интрузии несмачивающей жидкости в него.

Используя теорию перколяции, Кац и Томпсон [19] рассчитывают по кривой интрузии проницаемость образца и извилистость пор. Метод Майера–Стоу [21], основанный на модели проникновения жидкостей в пустотные пространства набора однородных сплошных сфер, упакованных регулярно, позволяет рассчитать гранулометрический состав и отношение диаметров полости и устья поры. Ангуло и соавторы [20] показали, что фрактальная размерность поровой поверхности может быть определена методом ртутной интрузионной порометрии. Для получения истинного распределения пор с учетом чередования крупных и мелких пор можно успешно использовать метод Ревербери [18].

В управляющей программе ртутного поромера последнего поколения AutoPore V [21] реализованы перечисленные выше методики. Программа имеет не только расширенные возможности для анализа кривой интрузии ртути, но и широкие возможности представления результатов. Это разнообразные табличные и графические отчеты, средства наложения графиков для нескольких образцов и создания комбинированных графиков. Программа может работать автономно в режиме обработки данных и функционирует под операционной системой Windows. При этом, что важно, она включает в себя функционал импорта кривой интрузии. Данная программа была любезно предоставлена разработчиками ртутного поромера AutoPore V для эксплуатации.

В рамках модернизации управляющего комплекса поромера AutoPore III 9420 было принято решение: реализовав импорт получаемых данных, использовать расширенные возможности для анализа, представленные в обрабатывающей программе поромера AutoPore V.

Для этих целей на языке C++ в среде разработки MS Visual C++ была разработана программа ConvertPor, работающая под операционной средой Windows. Считывая кривую интрузии из ASCII-файла порограммы, программа ConvertPor переформатирует ее в файл, удовлетворяющий требованиям операции импорта обрабатывающей программы ртутного поромера AutoPore V.

Невозможность использования драйвера русификации в управляющем блоке поромера AutoPore III 9420 не позволяет заполнить паспорт образца надлежащим образом в процессе измерения. Приходится применять методы транслитерации. Обходя это досадное ограничение, одновременно с переформатированием кривой интрузии оператор может изменить паспорт исследуемого образца, содержащий его важнейшие характеристики, такие как номер в коллекции, название месторождения, минеральный состав, глубина залегания, описание, плотность и пр. Изменение, а точнее, создание полноценного паспорта образца осуществляется в диалоговом окне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена и реализована методика модернизации управляющего блока ртутного интузионного поромера AutoPore III 9420. Высокотехнологичный научный прибор, эксплуатирующийся с 1995 года, сохранив механические и гидравлические компоненты в удовлетворительном состоянии, оказался неработоспособным вследствие деградации управляющего блока.

Предложенный комплекс решений, основанный на замене проблемных электронных компонент на CF-карту, позволил не только восстановить работоспособность управляющего комплекса, но и собрать резервный управляющий блок, страхующий исследовательскую программу от неожиданных аварийных остановок.

С учетом высокой стоимости такого оборудования задача модернизации выглядит оправданной и востребованной. Данная частная задача отражает общую тенденцию, связанную со старением приборного парка страны. Нахождение путей модернизацией устаревающего оборудования – актуальная проблема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тодосийчук А.В.* Наука как фактор социального прогресса и экономического роста. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: НИИ экономики науки и образования, 2005. – 500 с.

2. *Евдокимов И.Н., Лосев А.П.* Реабилитация спектрофотометров Specord UV VIS в практике лабораторных исследований // Бурение и нефть. – 2006. – № 12. – С. 38–39.

3. *Левин А.* Модернизация электронных микроскопов // Наноиндустрия. – 2010. – № 2. – С. 36–37.

4. *Мохов Д.О., Ляшков В.И.* Модернизация рео-вискозиметра Гепплера // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2009. – № 1 (15). – С. 129–133.

5. *Бавыкин О.Б., Вячеславова О.Ф.* Модернизация микроинтерферометра МИИ-4 // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 290–293.

6. *Алехин А.Г.* Модернизация рычажно-механического прибора // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 7 (110). – С. 72–74.

7. *Кирилловский В.К., Голубев А.М.* Модернизация рефрактометра Аббе и теоретическое обоснование повышения его точности // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 1. – С. 56–60.

8. *Одиванов В.Л., Идиятуллин Б.З.* Модернизация ЯМР-спектрометров высокого разрешения TESLA BS 587A и TESLA BS 567A // Приборы. – 2008. – № 5. – С. 3–7.

9. *Куликов Н.В., Канашина В.Ф.* Остаточная нефтенасыщенность газовых пластов // Геология нефти и газа. – 1991. – № 1. – С. 23–25.

10. Макропористые катализаторы для жидкофазного окисления на основе оксидов марганца и вольфрама / В.А. Авраменко, С.Ю. Братская, Е.К. Папынов, В.Ю. Майоров, М.С. Паламарчук // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2011. – № 5 (159). – С. 76–87.

11. Количественная оценка добывных характеристик коллекторов нефти и газа по петрофизическим данным и материалам ГИС / Л.М. Дорогиницкая, Т.Н. Дергачева, А.Р. Анашкин, А.И. Колыванов, С.В. Кушнарев, Л.Д. Худякова, Е.А. Романова. – Томск: STT, 2007. – 277 с.

12. *Плаченов Т.Г., Колосенцев С.Д.* Порометрия. – Л.: Химия, 1988. – 175 с.

13. *Klobes P., Meyer K., Munro R.G.* Porosity and specific surface area measurements for solid materials / National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, Md., 2006. – 98 p. – (NIST recommended practice guide; NIST special publication, 960-17).

14. Объем жесткого диска [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Объем_жесткого_диска (дата обращения: 14.09.2018).

15. Hard Disk Size Barriers [Electronic resource]. – URL: http://www.pcguide.com/ref/hdd/bios/size.htm (accessed: 14.09.2018).

16. *Washburn E.W.* Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1921. – Vol. 7, N 4. – P. 115–116.

17. AutoPore V – Mercury Intrusion Porosimeter [Electronic resource]. – URL: http://www.micromeritics.com/Product-Showcase/AutoPore-V.aspx (accessed: 14.09.2018).

18. *Reverberi A., Ferraiolo G., Peloso A.* Determination by experiment of the distribution function of the cylindrical macropores and ink bottles in porous systems // Annali di Chimica. – 1966. – Vol. 56, N 12. – P. 1552–1561.

19. *Katz A.J., Thompson A.H.* Quantitative prediction of permeability in porous rock // Physical Review, Series B. – 1986. – Vol. 34. – P. 8179–8191. – doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.34.8179.

20. *Angulo R.F., Alvarado V., Gonzalez H.* Fractal dimensions from mercury intrusion capillary tests // SPE Latin America Petroleum Engineering Conference, 8–11 March 1992. – Caracas, Venezuela, 1992. – doi: https://doi.org/10.2118/23695-MS.

21. *Mayer R.P., Stowe R.A.* Mercury porosimetry – breakthrough pressure for penetration between packed spheres // Journal of Colloid Science. – 1965. – Vol. 20, N 8. – P. 893–911. – doi: https://doi.org/10.1016/0095-8522(65)90061-9.

Заикин Андрей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и теоретической физики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – механики деформируемого твердого тела. Имеет более 20 научных публикаций. E-mail: zaikin@pitf.ftf.nstu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-135-144

AutoPore III mercury porosimeter upgrading[*]

A.D. ZAIKIN

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

zaikin@pitf.ftf.nstu.ru

Abstract

The experience of modernization of a specialized device, namely the mercury intrusion porosimeter AutoPore III 9420, is described.

The method of modernization was chosen based on the condition of the device parts: mechanical and hydraulic control functioned well after a long operation, but the control unit outlived its service life. A controller board was developed for the outdated ISA system bus and therefore the problem couldn't be solved by simply replacing the computer with a modern one. Magnetic storage devices, both HDD and FDD, were a bottleneck in the regular control unit. A special IDE adapter was used to replace both storage devices with a CF card that combined their functions. The control software running under DOS uses undocumented features of the operating system, which imposes a certain limitation on the configuration. The implemented technical solution allowed us to accumulate measurement results on a CF card and at the same time to use it for data transfer.

The availability of a backup controller board made it possible to apply another upgrade option. A duplicate control unit was assembled on the motherboard containing ISA and PCI slots. In this case, a CF card is used as a non-removable disk. The USB controller for the PCI slot was used to transfer data via a flash drive. Sequential use of control-transfer modes is achieved in a multi-boot mode.

A program was written that allows us to convert the AutoPore III metering protocol containing the mercury intrusion curve and the calculation of pore space parameters based on the cylindrical pore model, into a file that can be imported into a modern specialized program for processing the results of the AutoPore V measurements. The latter program allows us to calculate the permeability of a sample and tortuosity of pores, the granulometric composition and the ratio of the cavity diameter and mouth opening, as well as fractal dimensions of a pore surface. Therefore it enhances the value of the analysis.

Keywords: mercury porosimeter, Autopore III, upgrading, controller, CF card, control program, interface bus, data import

REFERENCES

1. Todosiichuk A.V. *Nauka kak faktor sotsial'nogo progressa i ekonomicheskogo rosta* [Science as a factor of social progress and economic growth]. 2nd ed. Moscow, NII ekonomiki nauki i obrazovaniya Publ., 2005. 500 p.

2. Evdokimov I.N., Losev A.P. Reabilitatsiya spektrofotometrov Specord UV VIS v praktike laboratornykh issledovanii [Rehabilitation of spectrophotometers Specord UV VIS in laboratory practice]. *Burenie i neft' – Drilling and Oil*, 2006, no. 12, pp. 38–39.

3. Levin A. Modernizatsiya elektronnykh mikroskopov [Modernization of electron microscopes]. *Nanoindustriya – Nanoindustry*, 2010, no. 2, pp. 36–37.

4. Mokhov D.O., Lyashkov V.I. Modernizatsiya reo-viskozimetra Gepplera [Modernization of Heppler rheometer]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo – Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*, 2009, no. 1 (15), pp. 129–133.

5. Bavykin O.B., Vyacheslavova O.F. Modernizatsiya mikrointerferometra MII-4 [Modernization of microinterferometer MII-4]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI – Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 290–293. (In Russian).

6. Alekhin A.G. Modernizatsiya rychazhno-mekhanicheskogo pribora [Modernization of the lever-mechanical device]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2013, vol. 9, no. 7 (110), pp. 72–74.

[*] *Received 05 May 2018.*

7. Kirillovskii V.K., Golubev A.M. Modernizatsiya refraktometra Abbe i teoreticheskoe obosnovanie povysheniya ego tochnosti [Modernization of Abbe refractometer and theoretical justification of increase in its accuracy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 1, pp. 56–60.

8. Odivanov V.L., Idiyatullin B.Z. Modernizatsiya YaMR-spektrometrov vysokogo razresheniya TESLA BS 587A i TESLA BS 567A [Modernization of high-resolution NMR spectrometers TESLA BS 587A and TESLA BS 567A]. *Pribory – Instruments*, 2008, no. 5, pp. 3–7.

9. Kulikov N.V., Kanashina V.F. Ostatochnaya neftenasyshchennost' gazovykh plastov [Residual oil saturation of gas layers]. *Geologiya nefti i gaza – Oil and Gas Geology*, 1991, no. 1, pp. 23–25.

10. Avramenko V.A., Bratskaya S.Yu., Papynov E.K., Maiorov V.Yu., Palamarchuk M.S. Makroporistye katalizatory dlya zhidkofaznogo okisleniya na osnove oksidov margantsa i vol'frama [Macroporous catalysts for liquid-phase oxidation on the basis manganese and tungsten oxides]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk – Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2011, no. 5 (159), pp. 76–87.

11. Doroginitskaya L.M., Dergacheva T.N., Anashkin A.R., Kolyvanov A.I., Kushnarev S.V., Khudyakova L.D., Romanov E.A., Golikov N.A., Melkozerova S.N. *Kolichestvennaya otsenka dobyvnykh kharakteristik kollektorov nefti i gaza po petrofizicheskim dannym i materialam GIS* [Quantitative estimation of oil and gas reservoirs production characteristics on petrophysical data and GIS materials]. Tomsk, STT Publ., 2007. 277 p.

12. Plachenov T.G., Kolosentsev S.D. *Porometriya* [Porosimetry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1988. 175 p.

13. Klobes P., Meyer K., Munro R.G. *Porosity and specific surface area measurements for solid materials*. National Institute of Standards and Technology. *NIST recommended practice guide*. Gaithersburg, Md., 2006. 98 p.

14. Ob"em zhestkogo diska [Hard disk space]. *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/?oldid=91816196 (accessed 14.09.2018).

15. *Hard Disk Size Barriers*. Available at: http://www.pcguide.com/ref/hdd/bios/size.htm (accessed 14.09.2018).

16. Washburn E.W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1921, vol. 7, no. 4, pp. 115–116.

17. *AutoPore V – Mercury Intrusion Porosimeter*. Available at: http://www.micromeritics.com/Product-Showcase/AutoPore-V.aspx (accessed 14.09.2018).

18. Reverberi A., Ferraiolo G., Peloso A. Determination by experiment of the distribution function of the cylindrical macropores and ink bottles in porous systems. *Annali di Chimica*, 1966, vol. 56, no. 12, pp. 1552–1561.

19. Katz A.J., Thompson A.H. Quantitative prediction of permeability in porous rock. *Physical Review, Series B*, 1986, vol. 34, pp. 8179–8191. doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.34.8179.

20. Angulo R.F., Alvarado V., Gonzalez H. Fractal dimensions from mercury intrusion capillary tests. *SPE Latin America Petroleum Engineering Conference*, Caracas, Venezuela, 8–11 March 1992. doi: https://doi.org/10.2118/23695-MS.

21. Mayer R.P., Stowe R.A. Mercury porosimetry – breakthrough pressure for penetration between packed spheres. *Journal of Colloid Science*, 1965, vol. 20, no 8, pp. 893–911. doi: https://doi.org/10.1016/0095-8522(65)90061-9.

Для цитирования:

Заикин А.Д. Модернизация ртутного поромера AutoPore III // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 135–144. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-135-144.

For citation:

Zaikin A.D. Modernizatsiya rtutnogo poromera AutoPore III [AutoPore III Mercury porosimeter upgrading]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 135–144. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-135-144.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 145–156

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 145–156

ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

УДК 621.311 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-145-156

Исследование технико-экономических показателей системы комбинированного теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами*

О.К. ГРИГОРЬЕВА[a], А.А. ФРАНЦЕВА[b], О.В. БОРУШ[c]

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

[a] *ok-grigoryeva@mail.ru* [b] *frantsevaalina@gmail.ru* [c] *aborush@ngs.ru*

Существующая в России традиционная централизованная система теплоснабжения имеет ряд недостатков, связанных с высокой температурой сетевой воды, большими тепловыми потерями и увеличением износа теплотрасс. Устранение этих недостатков возможно снижением температуры прямой сетевой воды и переходом на комбинированную систему теплоснабжения. В качестве такой системы в статье рассматривается ТЭЦ с газосетевым подогревателем (ГСП) и фреоновыми термотрансформаторами (ФТТ). Термодинамические и конструктивные характеристики фреонового термотрасформатора как элемента комбинированной системы теплоснабжения оказывают влияние на работу ТЭЦ в целом и на параметры системы теплоснабжения потребителей. В качестве рабочих тел ФТТ были рассмотрены лидирующие на рынке низкокипящие рабочие тела (НРТ) R134a, R404a, R600a. Для каждого из них определены площади поверхности теплообмена испарителя, конденсатора и поэлементные капиталовложения в ФТТ. Для современных рыночных условий характерны изменения ценовой политики, поэтому в статье рассматривались три варианта капиталовложений в ФТТ с увеличением стоимости элементов ФТТ и самого НРТ. Показано влияние вариантов капиталовложений на технико-экономическую эффективность работы ТЭЦ с ГСП и ФТТ с учетом изменения теплофикационной нагрузки энергоблока. Также технико-экономическая эффективность сравнивалась с эффективностью традиционной системы теплоснабжения. В выводах говорится о высоких площадях поверхности конденсатора и испарителя ФТТ и высоких капиталовложениях ФТТ при его работе на R600a. Переход от традиционной системы теплоснабжения к ТЭЦ с ГСП и ФТТ при повышении стоимости элементов ФТТ в полтора раза становится невыгодным для теплофикационных блоков с турбиной мощностью 250 МВт, а при повышении в два раза – для энергоблоков со всеми вариантами теплофикационных турбин.

Ключевые слова: теплоснабжение, испаритель, эффективность, термотрансформатор, капиталовложения, фреон, сетевая вода, теплофикация, газосетевой подогреватель

* *Статья получена 01 марта 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Существующая в России система централизованного теплоснабжения позволила эффективным образом решить задачи, связанные с надежным обеспечением теплом и электроэнергией. Однако из-за высокой температуры сетевой воды и большой протяженности тепловых сетей характерны следующие недостатки: большие потери теплоты, высокая аварийность и малый ресурс теплотрасс [1]. Основная причина роста тепловых потерь в сетях заключается в увеличении количества изношенных трубопроводов, несмотря на существенно возросшие объемы их ремонта и замены [2]. Устранение вышеотмеченных недостатков возможно при снижении температуры сетевой воды после перехода с высокотемпературного графика на график пониженной температуры сетевой воды до 40…70 °С. Такой переход позволяет повысить выработку электрической энергии за счет увеличения пропуска пара через конденсатор паровой турбины или при том же количестве вырабатываемой электрической энергии снизить затраты на топливо [3, 4]. При этом в качестве теплоэнергетических установок, догревающих сетевую воду до необходимой температуры для потребителя, применяются ГТУ, ДВС, мини-ТЭЦ, тепловые насосы [5–7]. Одним из вариантов применения технологии с низкотемпературным графиком сетевой воды является ТЭЦ с газосетевым подогревателем (ГСП) и фреоновыми термотрансформаторами (ФТТ) (рис. 1) [8]. Особенностью технологической схемы рассматриваемой ТЭЦ является замещение нижнего сетевого подогревателя газовым сетевым подогревателем, утилизирующим теплоту уходящих из ГТУ газов. При этом вытесняется нижний теплофикационный отбор паровой турбины, что изменяет расход острого пара на турбину. По сравнению с традиционным паротурбинным энергоблоком в ПГУ с ГСП увеличивается выработка электроэнергии. Наличие у потребителя внутриквартального ФТТ обусловливает переход ТЭЦ с нормативного температурного графика к графику с пониженными температурами прямой и обратной сетевой воды, что приводит к уменьшению теплопотерь в магистральных теплопроводах, повышению надежности их работы и росту КПД транспорта тепла, что также приводит к экономии топлива. Эти особенности влияют на термодинамические и конструктивные параметры энергоблока.

При работе ТЭЦ с ГСП и ФТТ в течение всего года сетевая вода подогревается до 70 °С в ГСП уходящими газами из газовой турбины. При включении отопительной нагрузки сетевая вода также параллельно подогревается в традиционном сетевом подогревателе паром из теплофикационного отбора паровой турбины. Далее – к фреоновым термотрансформаторам.

При работе термотрансформатора в составе комбинированной системы теплоснабжения сетевая вода, подводимая от ТЭЦ как основного источника теплоснабжения, охлаждается в испарителе ФТТ. При этом фреон испаряется. Затем пар сжимается компрессором и поступает в конденсатор, после конденсации дросселируется. В конденсаторе нагревается идущая на отопление внутриквартальная сетевая вода теплопотребителя.

ГСП покрывает нагрузку только горячего водоснабжения. И исходя из этого условия рассчитывается количество тепла с уходящими из газовой турбины газами, а следовательно, и сопряженная мощность газотурбинной установки. Для отопительной нагрузки выполняется температурный график

70/40 °С во всем диапазоне температур окружающего воздуха при количественном регулировании. ФТТ обеспечивают у теплопотребителя качественное регулирование при максимальной температуре внутриквартальной сетевой воды на уровне 85 °С.

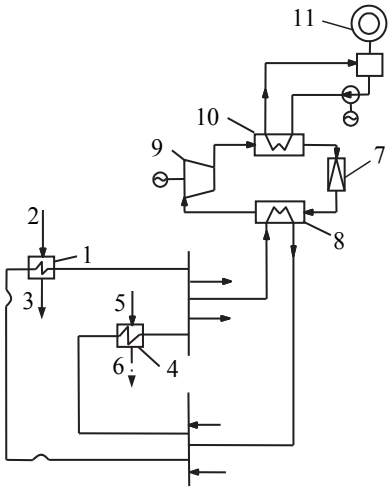


Рис. 1. Схема комбинированного теплоснабжения с газосетевыми подогревателями и внутриквартальными фреоновыми термотрансформаторами:

1 – газовый сетевой подогреватель; *2* – продукты сгорания после газовой турбины; *3* – отвод уходящих газов в дымовую трубу; *4* – традиционный сетевой подогреватель; *5* – пар теплофикационного отбора паровой турбины; *6* – сброс дренажа в систему регенерации; *7* – дроссель; *8* – испаритель; *9* – компрессор; *10* – конденсатор; *11* – тепловой потребитель

Fig. 1. A circuit of combined heat supply with GN heaters and submain freon thermal transformers:

1 is a network gas heater; *2* is combustion products after the gas turbine; *3* is gas withdrawal ino the smoke stack;*4* is a conventional network heater; *5* is steam of the steam turbine heat-extraction; *6* is drain disposal into the regeneration system; *7* is a throttle; *8* is an evaporator; *9* is a compressor; *10* is a capacitor; *11* is a heat consumer

В качестве рабочих тел теплового насоса используются низкокипящие рабочие тела (НРТ), которые оказывают влияние на расходно-термодинамические параметры ФТТ, работу компрессора, условия теплообмена в испарителе и конденсаторе, являющемся внутриквартальным сетевым подогревателем, формируют профиль ФТТ и его экологические параметры озонобезопасных веществ [9].

В настоящее время значительно продвинулись на рынке и прочно вошли в практику хлорнесодержащие фреоны R134a и R404a, используемые в качестве заменителя запрещенных озоноразрушающих R12 и R22. Однако данные фреоны имеют высокий коэффициент глобального потепления, и в перспективе целесообразно рассматривать варианты их замены [10]. Хорошей альтернативой может служить хладагент R600a, который имеет значительные экологические преимущества и обладает более высоким холодильным коэффициентом, что уменьшает энергопотребление [9, 11].

Термодинамические параметры цикла ФТТ определялись с использованием уравнения Мартина–Хоу [12], В.В. Алтунина [13] и методов термодинамического подобия [14].

Температуры испарения ($T_{исп}$) и конденсации ($T_{конд}$) находятся в зависимости от температуры обратной сетевой воды (в расчетах принята на уровне 70 °С) и прямой внутриквартальной сетевой воды (в расчетах принята на уровне 75 °С) с учетом температурных напоров на холодном конце испарителя ($\delta t_х$) и горячем конце конденсатора ($\delta t_г$).

Давление испарения и конденсации фреона находится последовательно при подстановке в формулы соответствующих температур $T_{\text{исп}}$, $T_{\text{конд}}$:

$$P = P_{\text{кр}} \exp\left\{ m \ln\left(\frac{T_{\text{исп}}}{T_{\text{кр}}}\right) - \lambda \left[\left(\frac{T_{\text{исп}}}{T_{\text{кр}}}\right)^6 - \frac{36}{\left(\frac{T_{\text{исп}}}{T_{\text{кр}}}\right)} + 35 \right] \right\}, \qquad (1)$$

где $T_{\text{кр}}$ – критическая температура фреона; $P_{\text{кр}}$ – критическое давление; $\lambda = -0,305$; $m = -5,375$.

Коэффициент теплоотдачи к теплоносителю при вынужденном движении в трубах оценивается по следующему выражению:

$$\alpha = A w^{n_1} d^{n_2} q^{n_3} \mu^{m_1} P_{\text{кр}}^{m_2} T_{\text{кр}}^{m_3} R_0^{m_4} f(\pi, \tau, K_{z_1}, K_{z_2}), \qquad (2)$$

где K_{z_1}, K_{z_2} – критерии подобия; q – тепловой поток; π, τ – безразмерные давление и температура.

В выражении (2) весь комплекс перед функцией f должен иметь размерность коэффициента теплоотдачи. Показатели степени *n, m* определяются на основе анализа размерностей. Причем для режимных параметров *w*, *d* (скорости и диаметра трубок) показатели степени должны приниматься по экспериментальным данным.

Принимая за основу критериальное уравнение

$$\text{Nu}_m = 0,021 \text{Re}_m^{0,8} \text{Pr}_m^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_m}{\text{Pr}_c}\right)^{0,25}, \qquad (3)$$

где Nu, Re, Pr – критерии подобия, получим следующие значения показателей степени:

$$n_1 = \frac{4}{5}, \quad n_2 = -\frac{3}{10}, \quad n_3 = \frac{3}{20};$$

$$m_1 = -\frac{1}{40}, \quad m_2 = \frac{3}{4}, \quad m_3 = -\frac{7}{8}, \quad m_4 = \frac{1}{8}.$$

Обозначим

$$У_* = \mu^{-1/40} T_{\text{кр}}^{-7/8} P_{\text{кр}}^{3/4}. \qquad (4)$$

С учетом показателей степени получаем

$$\alpha_* = A_* w^{4/5} d^{-3/10} q^{3/20} R_0^{1/8} У_* f_*(\pi, \tau, K_{z_1}, K_{z_2}). \qquad (5)$$

Параметры в выражении (5) имеют размерность: w – [м/с]; d – [м]; q – [Вт/м^2]; $P_{кр}$ – [Н/м^2]; $T_{кр}$ – [К]; α – [Вт/м^2·К]. Величина $У_*$ является универсальным множителем и характеризует влияние критических параметров и молекулярной массы на процесс теплоотдачи. Функция f_* универсальна для термодинамически подобных веществ и характеризует влияние приведенных параметров на теплоотдачу.

При расчете теплообмена в качестве базовых веществ приняты вода и водяной пар.

Коэффициент теплоотдачи определялся как

$$\left(\frac{\alpha_{R134A}}{\alpha_{H_2O}}\right)=\frac{У_{R134A}}{У_{H_2O}}, \tag{6}$$

где $У_{H_2O}=\dfrac{P_{кр}^{0,75}}{\mu^{0,025}T_{кр}^{0,875}}$.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации и испарении находится при подстановке в формулы давления испарения и конденсации:

$$\alpha_к=0,433\cdot 11,6\cdot 10^3\left(\frac{20}{\Delta_к}\right)^{0,25}\left(\frac{100\cdot 10^5}{5,44\cdot P_к}\right)^{0,53}, \tag{7}$$

где $\Delta_к$ – логарифмический температурный напор в конденсаторе;

$$\alpha_{исп}=0,433\cdot 23,6\cdot 10^3\left(\frac{\Delta_{исп}}{45}\right)^{1,2}\left(\frac{5,44\cdot P_{исп}}{10^6}\right)^{0,3}. \tag{8}$$

Поверхности теплообмена конденсатора

$$F_{кон}=\frac{0,7Q_н^т}{\Delta_к\dfrac{8,04\cdot 10^{-3}\alpha_к}{8,04+\alpha_к}} \tag{9}$$

и испарителя

$$F_{исп}=\frac{0,6Q_н^т}{\Delta_{исп}\dfrac{7,83\cdot 10^{-3}\alpha_{исп}}{7,83+\alpha_{исп}}}, \tag{10}$$

где $Q_н^т$ – тепловая нагрузка турбины, МВт.

Так как давление испарения и конденсации зависит от НРТ, то площадь поверхности теплообменников термотрансформатора также зависит только

от НРТ. При этом наибольшее значение площади имеют теплообменные поверхности при работе на R600a (рис. 2), так как коэффициент теплопередачи для R600a имеет наименьшее значение и находится на уровне 3300 Вт/м^2·К при конденсации и 9300 Вт/м^2·К при испарении.

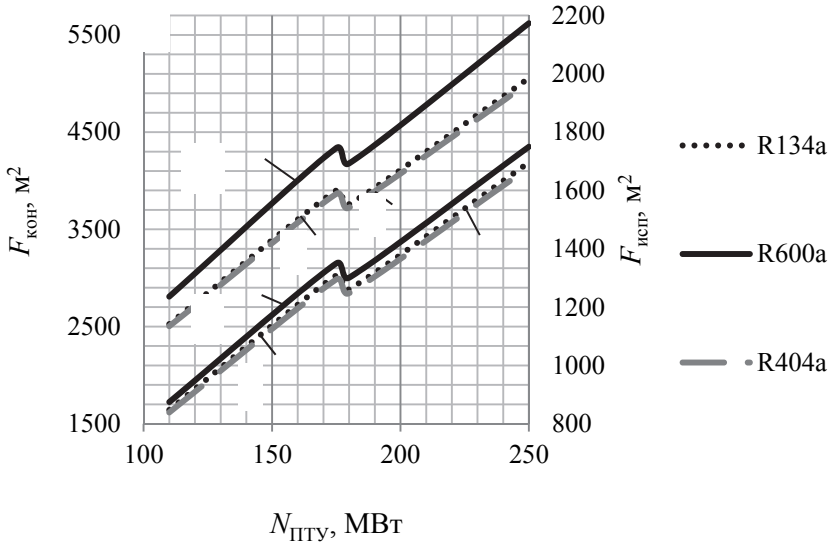


Рис. 2. Зависимость площади поверхности теплообмена конденсатора и испарителя фреоновых термотрансформаторов от электрической мощности паротурбинной установки:

1, *2*, *3* – площадь конденсатора; *4*, *5*, *6* – площадь испарителя

Fig. 2. The dependence of the heat exchange surface area of the condenser and evaporator of Freon thermal transformers on the electric power of the heat-turbine plant:

1, *2*, *3* is the condenser area; *4*, *5*, *6* is the evaporator area

С ростом мощности паротурбинной установки наблюдается увеличение площадей поверхности конденсации и испарения, связанное с повышением теплофикационной нагрузки ТЭЦ с ГСП и ФТТ.

При переходе от традиционной системы теплоснабжения к ТЭЦ с фреоновыми термотрансформаторами к основным капиталовложениям в энергоблок дополнительно необходимо учитывать капиталовложения в фреоновый термотрансформатор:

$$К_{ФТТ} = 0{,}1 Q_{н}^{т} К_{ком} \left(\frac{P_{к}}{P_{исп}} \right)^{0{,}1} + К_{кон+исп} (F_{исп} + F_{кон}), \qquad (11)$$

где $К_{ком} = 300$ – капиталовложения в компрессор, \$/кВт; $К_{кон+исп} = 1500$ – капиталовложения в конденсатор и испаритель, \$/м^2.

Таблица 1

Table 1

Капиталовложения в элементы фреонового термотрансформатора

Capital investments in the elements of the Freon thermal generator

Рабочее тело	Элемент ФТТ	Мощность теплофикационного энергоблока, МВт			
		110	175	180	250
R134a	Компрессор	6 099 000	9 420 000	9 075 000	12 207 000
	Испаритель	1 271 250	1 963 500	1 891 500	2 544 000
	Конденсатор	3 789 000	5 851 500	5 637 000	7 584 000
R600a	Компрессор	6 099 000	9 420 000	9 075 000	12 207 000
	Испаритель	1 311 600	2 025 000	1 951 500	2 625 000
	Конденсатор	4 212 000	6 505 500	6 267 000	2 518 500
R404a	Компрессор	6 099 000	9 420 000	9 075 000	12 207 000
	Испаритель	1 258 200	1 942 500	1 872 000	2 518 500
	Конденсатор	1 754 500	5 797 500	5 584 500	7 513 500

Основным показателем работы ТЭЦ с ГСП и ФТТ является технико-эконо-мическая эффективность η_Z, определяемая по общему интегральному эффекту (как разность между общим интегральным результатом от производственной деятельности объекта и общими интегральными затратами) и рассматриваемая как интегральный социально-экономический эффект, учитывающий влияющие системные факторы [15, 16].

Учитывая особенности современных рыночных условий, которые характеризуются изменением ценовой политики, рассматривались три варианта изменения цены при поэлементном определении капиталовложений фреонового термотрансформатора (стоимости компрессора, испарителя и конденсатора, фреона R134A, R600a, R404a) (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Варианты капиталовложений во фреоновый термотрансформатор

Options of capital investments in the Freon thermal generator

Наименование	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Капиталовложения в компрессор	300	450	700
Капиталовложения в испаритель и конденсатор	1500	2000	3000
Стоимость рабочего тела	10	13	20

Энергоблоки ТЭЦ с ГСП и ФТТ со всеми вариантами теплофикационных турбин можно считать рентабельными, так как критерий эффективности больше единицы. При переходе от традиционной системы теплоснабжения от ТЭЦ с ПВК к комбинированной системе теплоснабжения с ГСП и ФТТ критерий технико-экономической эффективности увеличивается в среднем на 7,5 % (рис. 3–5).

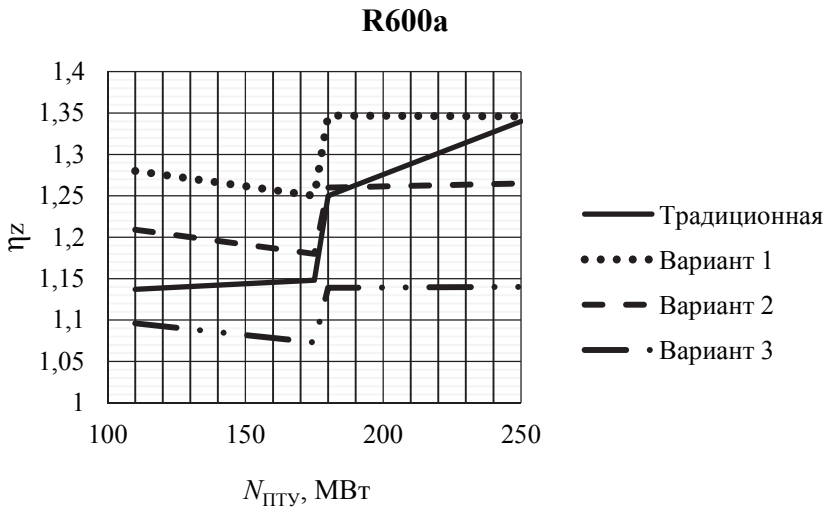


Рис. 3. Технико-экономическая эффективность традиционной ТЭЦ и ТЭЦ с ГСП и ФТТ при работе на фреоне R600a

Fig. 3. Technical and economic efficiency of a conventional HPP and HPP with GNH operating on the R600a freon

Увеличение стоимости элементов фреонового термотрансформатора в полтора раза для турбины Т-250 уже не приведет к технико-экономической выгоде по сравнению с традиционной системой теплоснабжения. Увеличение стоимости элементов внутриквартальных установок в два раза не приведет к ожидаемому технико-экономическому эффекту для всего ряда теплофикационных турбин.

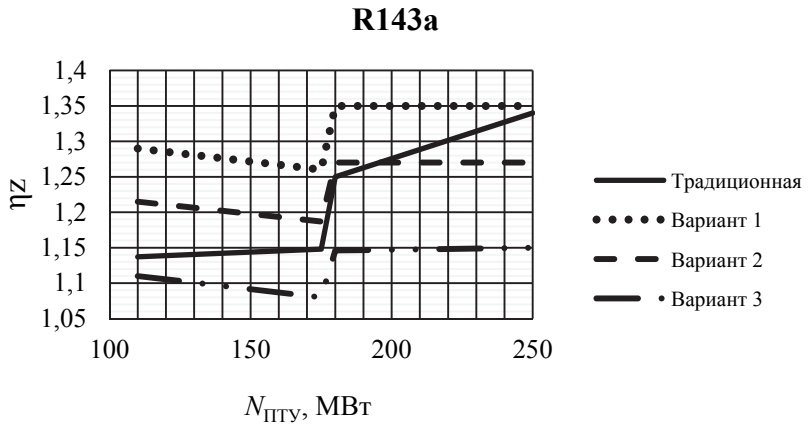


Рис. 4. Технико-экономическая эффективность традиционной ТЭЦ и ТЭЦ с ГСП и ФТТ при работе на фреоне R134a

Fig. 5. Technical and economic efficiency of a conventional HPP and HPP with GNH operating on the R134a freon

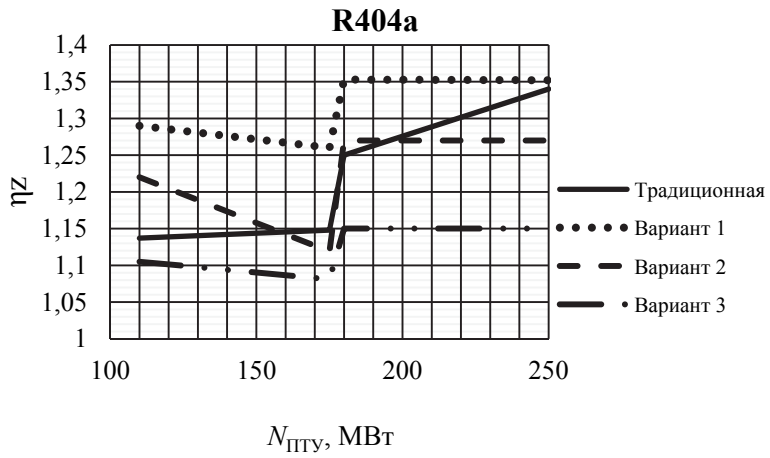


Рис. 5. Технико-экономическая эффективность традиционной ТЭЦ и ТЭЦ с ГСП и ФТТ при работе на фреоне R404a

Fig. 5. Technical and economic efficiency of a conventional HPP and HPP with GNH operating on the R404a freon

Рабочее тело внутриквартальных фреоновых термотрансформаторов не оказывает существенное влияние на технико-экономическую эффективность. Наибольший эффект дает переход к комбинированной системе теплоснабжения с паротурбинными установками мощностью 110 МВт (13,5 %), наименьшей – 250 МВт (0,74 %).

ВЫВОДЫ

Площади поверхности испарителя и конденсатора имеют наибольшее значение при работе фреоновых термотрансформаторов на рабочем теле R600a в связи с наименьшим коэффициентом теплоотдачи.

Капиталовложения в фреоновый термотрансформатор составляют наибольшее значение при работе на фреоне R600a в связи с увеличением металлоемкости фреонового термотрансформатора.

Переход от традиционной системы теплоснабжения к ТЭЦ с ГСП и ФТТ является технико-экономически невыгодным при повышении удельной стоимости элементов фреонового термотрансформатора в полтора раза для энергоблоков с теплофикационной турбиной мощностью 250 МВт и при повышении в два раза – для всех рассмотренных вариантов теплофикационных турбин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Славин В.С., Данилов В.В.* Повышение эффективности системы централизованного теплоснабжения на основе применения технологии тепловых насосов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2000. – № 2. – С. 6–13.

2. *Филиппов С.П.* Развитие централизованного теплоснабжения в России // Теплоэнергетика. – 2009. – № 12. – С. 2–14.

3. *Новожилов Ю.Н.* Применение тепловых насосов в схемах теплоснабжения // Промышленная энергетика. – 2006. – № 5. – С. 24–25.

4. *Андрющенко А.И.* Сравнительная эффективность применения тепловых насосов для централизованного теплоснабжения // Промышленная энергетика. – 1997. – № 6. – С. 2–4.

5. *Петрушкин А.В.* Эффективность комбинированных систем теплоснабжения: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Саратов, 1998. – 18 с.

6. *Morosyuk T.V.* Modeling selection of a heat pump integrated with a power unit // Chemical and Petroleum Engineering. – 1999. – Vol. 35. – P. 166–169.

7. *Бородихин И.В.* Исследование эффективности и оптимизация параметров ТЭЦ в комбинированной системе теплоснабжения с ДВС: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Новосибирск, 2004. – 20 с.

8. Патент 110459 Российская Федерация. Система централизованного теплоснабжения / О.К. Григорьева, А.А. Францева, Г.В. Ноздренко. – № 2011128340/12; заявл. 08.07.2011; опубл. 20.11.2011, Бюл. № 32. – 3 с.

9. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycle / B. Saleh, G. Koglbauer, M. Wendland, J. Fischer // The International Journal Energy. – 2007. – Vol. 32, N 10. – P. 1201–1221.

10. Обзор хладагентов [Электронный ресурс] / Битцер. – Изд. 13. A-501-13. – 35 с. – URL: http://s-holod72.ru/wp-content/uploads/2013/12/Review_refrigerant.pdf (дата обращения: 17.09.2018).

11. *Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е.* Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. – М.: Колос, 2000. – 160 с.

12. *Martin J.J., Hou Y.C.* Development of an equation of state for gases // AIChE Journal. – 1955. – Vol. 1, N 2. – P. 142–151.

13. *Алтунин В.В.* Метод составления уравнения состояния реального газа по ограниченному количеству исходных опытных данных // Теплоэнергетика. – 1962. – № 3. – С. 72–78.

14. *Перельштейн И.И.* Исследование термодинамических свойств холодильных агентов. – М.: Госиздат, 1962. – 62 с.

15. *Григорьева О.К.* Комплексное исследование ПГУ пылеугольных ТЭЦ с газовыми сетевыми подогревателями: дис. … канд. техн. наук. – Новосибирск, 2005. – 124 с.

16. *Францева А.А.* Оптимизационные исследование ТЭС с газосетевым подогревателем и фреоновыми термотрансформаторами: дис. … канд. техн. наук. – Новосибирск, 2015. – 111 с.

17. *Голубева Л.Ф., Григорьева О.К., Францева А.А.* Применение фреоновых технологий на тепловых электрических станциях // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 4 (65). – С. 164–174. – doi: 10.17212/1814-1196-2016-4-164-174.

Григорьева Оксана Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических стаций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – ТЭС с новыми технологиями, энергосбережение. Имеет более 45 публикаций. E-mail: ok-grigoryeva@mail.ru

Францева Алина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических стаций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – комбинированные системы теплоснабжения, энергосбережение. Имеет более 20 публикаций. E-mail: frantsevaalina@gmail.com

Боруш Олеся Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических стаций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями, энергосбережение. Имеет более 45 публикаций. E-mail: aborush@ngs.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-145-156

Study of technical and economic performance of the combined heat supply system with freon thermal transformers[*]

O.K. GRIGORIEVA[a], *A.A. FRANTSEVA*[b], *O.V. BORUSH*[c]

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

[a] *ok-grigoryeva@mail.ru* [b] *frantsevaalina@gmail.ru* [c] *aborush@ngs.ru*

Abstract

The conventional district heating system in Russia has a number of disadvantages associated with a high temperature of the network water, large heat losses and increased wear of heating mains. The removal of these disadvantages is possible by lowering the direct network water temperature and switching to a combined heat supply system. In the article a heat and power plant with a gas network heater (GNH) and freon thermal transformer (FTT) is considered as such a system. Thermodynamic and design characteristics of a thermal transformer as an element of a combined heat supply system affect the operation of the heat and power plant and the parameters of a heat supply system for consumers. Market-leading low-boiling working fluids (LWF) R134a, R404a, R600a were considered as a working medium of FTT. The area of the heat-exchanging surface of the evaporator, of the condenser and of the elementwise capital investment in the FTT are determined for each of them, Modern market conditions are characterized by changes in the pricing policy; therefore, three options for investment in FTTs with an increase in the cost of FTT elements and LWFs are examined in the article. The influence of investment options on the technical and economic efficiency of heat and power plant operation with GNH and FTT is shown taking into account the change in the heat load of the power unit. Also, the technical and economic efficiency is compared with the efficiency of a traditional heat supply system. The conclusions reveal high surface areas of the condenser and the FTT evaporator and FTT high capital investment when it operates using the R600a working fluid. The transition from a traditional heat supply system to a heat and power plant with GNH and FTT with an increase in the cost of FTT elements is 50% less economical for heating units with a 250 MW turbine, and two times less efficient for power units with all versions of thermal turbines.

Keywords: heat supply, evaporator, efficiency, thermal transformer, investment, freon, network water, heating, gas-net heater

REFERENCES

1. Slavin V.S., Danilov V.V. Povyshenie effektivnosti sistemy tsentralizovannogo teplosnabzheniya na osnove primeneniya tekhnologii teplovykh nasosov [Increasing the efficiency of the district heating system based on the use of heat pump technology]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka – Energy Saving and Water Treatment*, 2000, no. 2, pp. 6–13.

2. Filippov S.P. Razvitie tsentralizovannogo teplosnabzheniya v Rossii [Development of district heating in Russia]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2009, no. 12, pp. 2–14. (In Russian).

3. Novozhilov Yu.N. Primenenie teplovykh nasosov v skhemakh teplosnabzheniya [Thermocompressor in heat supply circuit]. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 2006, no. 5, pp. 24–25.

4. Andryushchenko A.I. Sravnitel'naya effektivnost' primeneniya teplovykh nasosov dlya tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Comparative efficacy of heat pumps for district heating]. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 1997, no. 6, pp. 2–4.

[*] *Received 01 March 2018.*

5. Petrushkin A.V. *Effektivnost' kombinirovannykh sistem teplosnabzheniya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The efficiency of combined heat supply systems. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Saratov, 1998. 18 p.

6. Morosyuk T.V. Modeling selection of a heat pump integrated with a power unit. *Chemical and Petroleum Engineering*, 1999, vol. 35, pp. 166–169.

7. Borodikhin I.V. *Issledovanie effektivnosti i optimizatsiya parametrov TETs v kombinirovannoi sisteme teplosnabzheniya s DVS*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Research of efficiency and optimization of CHP parameters in the combined heat supply system with ICE. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2004. 20 p.

8. Grigorieva O.K., Frantseva A.A., Nozdrenko G.V. *Sistema tsentralizovannogo teplosnabzheniya* [District heating system]. Patent RF, no. 110459, 2011.

9. Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycle. *The International Journal Energy*, 2007, vol. 32, no. 10, pp. 1201–1221.

10. *Obzor khladagentov* [Refrigerant overview]. 13th ed. Available at: http://s-holod72.ru/wp-content/uploads/2013/12/Review_refrigerant.pdf (accessed 17.09.2018).

11. Babakin B.S., Stefanchuk V.I., Kovtunov E.E. *Al'ternativnye khladagenty i servis kholodil'nykh sistem na ikh osnove* [Alternative refrigerants and servicing of refrigeration systems based on them]. Moscow, Kolos Publ., 2000. 160 p.

12. Martin J.J., Hou Y.C. Development of an equation of state for gases. *AIChE Journal*, 1955, vol. 1, no. 2, pp. 142–151.

13. Altunin V.V. Metod sostavleniya uravneniya sostoyaniya real'nogo gaza po ogranichennomu kolichestvu iskhodnykh opytnykh dannykh [The method of compiling the equation of state of a real gas from a limited number of initial experimental data]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 1962, no. 3, pp. 72–78. (In Russian).

14. Perel'shtein I.I. *Issledovanie termodinamicheskikh svoistv kholodil'nykh agentov* [Investigation of the thermodynamic properties of refrigeration agents]. Moscow, Gosizdat Publ., 1962. 62 p.

15. Grigorieva O.K. *Kompleksnoe issledovanie PGU pyleugol'nykh TETs s gazovymi setevymi podogrevatelyami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Complex research CCGT coal-fired thermal power station with gas network heaters. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2005. 124 p.

16. Frantseva A.A. *Optimizatsionnye issledovanie TES s gazosetevym podogrevatelem i freonovymi termotransformatorami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Optimization studies of the heat and power plant with gaz-net heater and freon thermotransformers. PhD eng. sci. diss.] Novosibirsk, 2015. 111 p.

17. Golubeva L.F., Grigorieva O.K., Frantseva A.A. Primenenie freonovykh tekhnologii na teplovykh elektricheskikh stantsiyakh [The application of Freon technologies at heat power stations]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (65), pp. 164–174. doi: 10.17212/1814-1196-2016-4-164-174.

Для цитирования:

Григорьева О.К., Францева А.А., Боруш О.В. Исследование технико-экономических показателей системы комбинированного теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 145–156. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-145-156.

For citation:

Grigorieva O.K., Frantseva A.A., Borush O.V. Issledovanie tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei sistemy kombinirovannogo teplosnabzheniya s freonovymi termotransformatorami [Study of technical and economic performance of the combined heat supply system with freon thermal transformers]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 145–156. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-145-156.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 157–174

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 157–174

ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

УДК 621.311 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-157-174

Ликвидация неустойчивых однофазных коротких замыканий в транспонированных линиях в цикле ОАПВ с использованием автоматического шунтирования фазы*

С.Г. ДЖОНОНАЕВ

630005, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

jononaev.87@mail.ru

В работе дискутируются вопросы реализации однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) с использованием автоматического шунтирования фазы (АШФ) в транспонированных линиях. Доказывается, что учет реальной транспозиции при расчете восстанавливающихся напряжений (ВН) и вторичных токов дуги (ВТД) является обязательным условием. На основе алгоритма анализируются условия гашения вторичной дуги при ОАПВ с использованием АШФ в линиях 500 и 750 кВ при их длине 300 и 500 км. Как правило, в длинных линиях используется транспозиция фаз, состоящая их трех шагов транспозиции. При оценке ВН и ВТД такие линии обычно принимаются идеально транспонированными, т. е. обладающими симметрией фазных и межфазных параметров. В данной работе доказывается, что учет реальной транспозиции при оценке эффективности использования ОАПВ является обязательным условием. В случае реальной транспозиции ВН и ВТД зависят от того, в какой фазе выполняется ОАПВ. Максимальные ВН и ВТД при реальной транспозиции превосходят в 2,5…7,0 раз соответствующие величины в случае, когда линия представляется как идеально транспонированная. Наиболее неблагоприятные условия возникают в фазах, которые занимают крайние положения на среднем шаге транспозиции. Наибольший эффект применение ОАПВ дает, если длительность паузы составляет 0,5…1,0 с, для чего требуется ограничение вторичного тока дуги до 20…45 А (амплитудное значение). При паузе более 1,5…2,0 с ее длительность не оказывает существенного влияния на пропускную способность по условию динамической устойчивости.

Ключевые слова: однофазное автоматическое повторное включение, автоматическое шунтирование фазы, однофазные короткие замыкания (ОКЗ), восстанавливающиеся напряжения, вторичные токи дуги, идеально транспонированная линия, пауза ОАПВ, критичные фазы, расшунтирование фазы, ликвидация неустойчивых ОКЗ, ограничитель перенапряжения (ОПН), шунтирующие реакторы (ШР)

* *Статья получена 12 марта 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

В дальних электропередачах отказы практически полностью определяются авариями на линии в связи с большой ее длиной. При этом в линиях напряжением 500…1150 кВ подавляющая доля отключений вызывается однофазными короткими замыканиями [1].

Осуществление ОАПВ в электропередачах переменного тока затрудняется наличием подпитки места повреждения со стороны неотключенных фаз. Режимными параметрами, определяющими условия гашения вторичной дуги, являются вторичный ток дуги ВТД, протекающий в дуге до ее гашения, $I_{\text{д}}$, и восстанавливающиеся напряжения ВН в месте ОКЗ после погасания вторичной дуги, $U_{\text{вн}}$. По имеющимся данным, среднее время горения вторичной дуги в основном зависит от величины установившегося ВТД. Рекомендуемая зависимость максимального времени гашения вторичной дуги от амплитуды вынужденной составляющей вторичного тока дуги показана в [2, 3].

Широко применяемое ОАПВ с использованием четырехлучевых реакторов [4] для ликвидации неустойчивых ОКЗ решает эту проблему не лучшим образом, особенно когда речь идет о линиях длиной порядка 500 км.

Необходимо также отметить следующие недостатки, присущие ОАПВ с использованием четырехлучевых реакторов.

Первый недостаток состоит в возможности появления резонансных повышений напряжения в паузу ОАПВ, что накладывает ограничение на схему электропередачи в режиме ОАПВ.

Второй недостаток связан с необходимостью коммутации реакторных выключателей для введения в работу всех шунтирующих реакторов в паузу ОАПВ для обеспечения условий гашения вторичной дуги, поскольку в нормальных режимах при передаче значительных мощностей шунтирующие реакторы, как правило, отключены от линии реакторными выключателями по условиям режима напряжений. При этом отказ любой фазы одного из выключателей приводит к невозможности проведения ОАПВ, что усугубляет аварийную ситуацию и тем самым снижает надежность работы.

Третий недостаток состоит в том, что подключение шунтирующих реакторов при осуществлении ОАПВ приводит к понижению напряжения на шинах и соответственно снижает пропускную способность электропередачи по условию динамической устойчивости [5].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Устранить указанные недостатки ОАПВ с использованием четырехлучевых реакторов, а также повысить эффективность и надежность ликвидации неустойчивых ОКЗ позволяет другой способ, а именно ОАПВ с использованием автоматического шунтирования фазы АШФ с помощью быстродействующих шунтирующих выключателей [6–9].

На рис. 1 показана схема осуществления ОАПВ с АШФ. При возникновении ОКЗ на линии аварийная фаза отключается линейными выключателями В1 и В2, и затем с минимальной задержкой она шунтируется по концам линии шунтирующими выключателями ШВ1 и ШВ2. В результате создаются благоприятные условия для гашения вторичной дуги. В конце паузы ОАПВ

с АШФ происходит расшунтирование фазы и с минимально возможной задержкой включаются линейные выключатели.

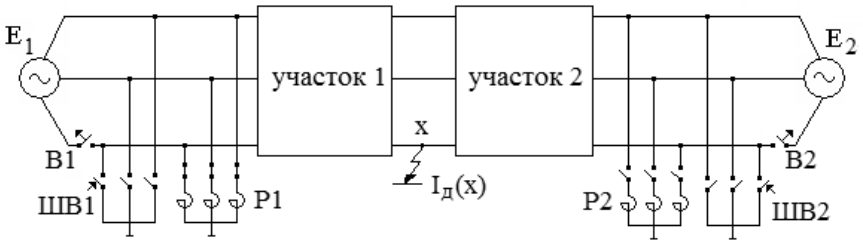


Рис. 1. Схема осуществления ОАПВ при АШФ

Fig. 1. A diagram of implementing *SPAR* with APS

В промежутке между расшунтированием фазы и включением линейных выключателей, который может составлять около 0,10…0,15 с, на аварийной фазе могут возникать недопустимые повышения напряжения. По условиям работы ограничителей перенапряжения (ОПН), установленных на концах линии, максимальные повышения напряжения такой длительности не должны превышать величины

$$U_{0,15\text{доп}} = 1,55U_{\text{ф}m},$$

где $U_{\text{ф}m}$ – наибольшее рабочее фазовое напряжение.

После расшунтирования начинается процесс восстановления напряжений на аварийной фазе, который имеет характер биений:

$$U_{\text{вн}}(t) = U_{\text{вн}}K(t),$$

где $U_{\text{вн}}$ – вынужденная составляющая напряжения в месте установки ОПН; $K(t) \le 2$ – коэффициент биений. Принимая максимальное значение коэффициента биений с учетом затухания $K_{\max} = 2$ и допустимую длительность повышения напряжения на ОПН $U_{\text{допОПН}} = 1,55U_{\text{ф}}$, найдем допустимое значение вынужденной составляющей напряжения в паузу ОАПВ из $2U_{\text{вын.доп}} = 1,55U_{\text{ф}}$. Соответственно для классов напряжения 500 и 750 кВ допустимое значение вынужденной составляющей ВН составит

$$U_{\text{вын.доп500}} = 240 \text{ кВ}, \quad U_{\text{вын.доп750}} = 350 \text{ кВ}.$$

Таким образом, расчетный алгоритм должен включать не только анализ ВН и ВТД при шунтировании фазы, но и оценку ВН после ее расшунтирования. Адекватное моделирование линии является необходимым условием для получения правильных результатов [10–14]. Как правило, в длинных линиях используется транспозиция фаз, состоящая их трех шагов.

2. АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВН И ВТД В ЛИНИЯХ С РЕАЛЬНОЙ ТРАНСПОЗИЦИЕЙ

Анализ будем проводить применительно к воздушной линии (ВЛ) сверхвысокого напряжения (СВН), имеющей горизонтальное расположение фаз, однократный цикл транспозиции (рис. 2) и геометрические размеры, приведенные в табл. 1.

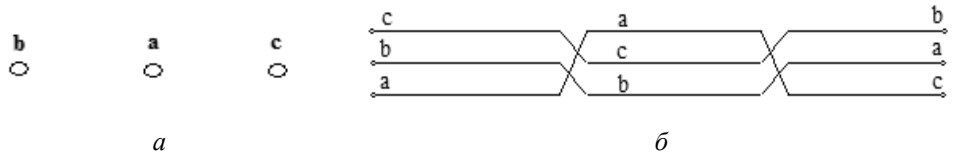


Рис. 2. Расположение линии в пространстве:

а – горизонтальное расположение фаз на опоре; *б* – схема однократного цикла транспозиции

Fig. 2. The position of a line in space:

a – is a horizontal phase position on the pole; *b* – is a circuit of a single transposition cycle

Таблица 1

Table 1

Геометрические параметры линии

Line geometry

Номинальное напряжение, кВ	Расстояние между соседними фазами, м	Средняя высота подвеса над землей, м	Конструкция фазы	Шаг расщепления, м
500	12	15	3×АС-330	0,4
750	17	16	5×АС-400	0,4

Для случая, когда линия предполагается идеально-транспонированной, параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Параметры идеально-транспонированной линии

Parameters of an ideally transposed line

Номинальное напряжение, кВ	Волновое сопротивление, Ом		Коэффициент фазы, рад/км	
	Прямая последовательность	Нулевая последовательность	Прямая последовательность	Нулевая последовательность
500	279	665	$1,065 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$
750	261	585	$1,076 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$

Расчетная схема для анализа ВН и ВТД при ОАПВ с АШФ показана на рис. 3.

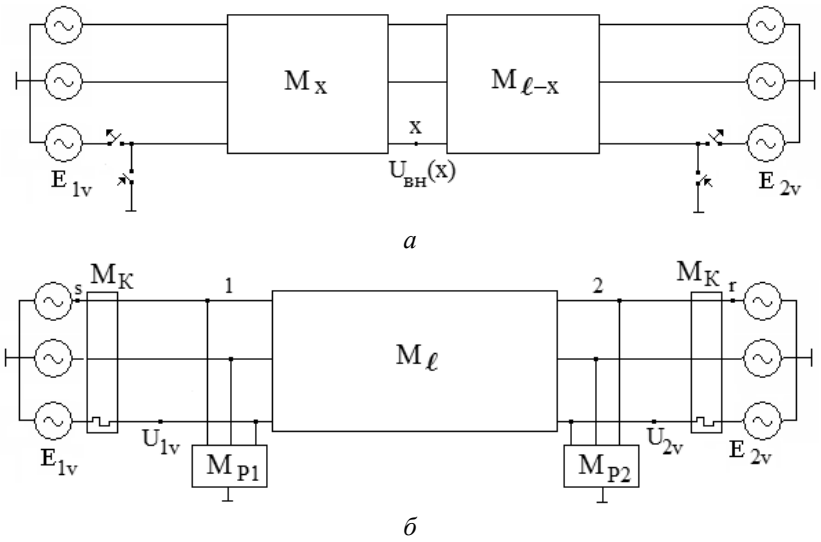


Рис. 3. Расчетная схема для анализа ВН при ОАПВ с АШФ:

а – ВН при АШФ; *б* – ВН по концам аварийной фазы после ее расшунтирования

Fig. 3. A design circuit to analyze RV at SPAR with APS:

a – RV with APS; *b* – RV at the ends of the breakdown phase after its shunt circuit removal

В зависимости от характера предаварийного режима шунтирующие реакторы могут быть либо подключены, либо отключены от линии. Однако на режим аварийной фазы при ОАПВ с АШФ они не оказывают влияния.

Удобнее сначала провести анализ ВН на аварийной фазе, после чего на основе теоремы об эквивалентном источнике найти вторичный ток дуги в произвольной точке линии согласно

$$I_{x\text{д}} = \frac{U_{x\text{вн}}}{R_{\text{д}} + Z_{x\text{вх}}}, \tag{1}$$

где $U_{x\text{вн}}$ – ВН в точке x линии; $R_{\text{д}}$ – сопротивление дуги; $Z_{x\text{вх}}$ – входное сопротивления схемы относительно точки x линии.

Режиму АШФ при отсутствии дуги на линии соответствует расчетная схема на рис. 3, *а*. Распределение фазных напряжений вдоль линии определяется следующим выражением:

$$\dot{\boldsymbol{U}}_x = \boldsymbol{B}_{\ell-\boldsymbol{x}} \cdot \boldsymbol{B}_\ell^{-1} \dot{\boldsymbol{E}}_1 + \boldsymbol{B}_x^T \left(\boldsymbol{B}_\ell^{-1}\right)^T \dot{\boldsymbol{E}}_2, \tag{2}$$

где $\boldsymbol{B}_{1x}^T$, $\left(\boldsymbol{B}_\ell^{-1}\right)^T$ – транспонированные матричные фазные коэффициенты от матричных фазных коэффициентов $\boldsymbol{B}_{1x}$ и $\boldsymbol{B}^{-1}$.

Матричные фазные коэффициенты для соответствующих частей линии относительно точки x и в целом для линии определяются из соотношений

$$\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{x}} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{x}} & \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{x}} \\ \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{x}} & \boldsymbol{D}_{\boldsymbol{x}} \end{vmatrix}, \quad \boldsymbol{M}_{\ell-\boldsymbol{x}} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{A}_{\ell-\boldsymbol{x}} & \boldsymbol{B}_{\ell-\boldsymbol{x}} \\ \boldsymbol{C}_{\ell-\boldsymbol{x}} & \boldsymbol{D}_{\ell-\boldsymbol{x}} \end{vmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}_{\ell} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{A}_{\ell} & \boldsymbol{B}_{\ell} \\ \boldsymbol{C}_{\ell} & \boldsymbol{D}_{\ell} \end{vmatrix} = \boldsymbol{M}_{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{M}_{\text{ш}1} \boldsymbol{M}_{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{M}_{\text{ш}2} \boldsymbol{M}_{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{M}_{\text{ш}3}, \tag{3}$$

где $\boldsymbol{B}_{x} = \begin{bmatrix} B_{xa} & B_{xab} & B_{xac} \\ B_{xba} & B_{xb} & B_{xbc} \\ B_{xca} & B_{xcb} & B_{xc} \end{bmatrix}$ $\boldsymbol{B}_{\ell-\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} B_{\ell-\boldsymbol{x}a} & B_{\ell-\boldsymbol{x}ab} & B_{\ell-\boldsymbol{x}ac} \\ B_{\ell-\boldsymbol{x}ba} & B_{\ell-\boldsymbol{x}b} & B_{\ell-\boldsymbol{x}bc} \\ B_{\ell-\boldsymbol{x}ca} & B_{\ell-\boldsymbol{x}b} & B_{\ell-\boldsymbol{x}c} \end{bmatrix}$,

$\boldsymbol{B}_{\ell} = \begin{bmatrix} B_{\ell a} & B_{\ell ab} & B_{\ell ac} \\ B_{\ell ba} & B_{\ell b} & B_{\ell bc} \\ B_{\ell ca} & B_{\ell cb} & B_{\ell c} \end{bmatrix}$ – матричные фазные коэффициенты для соответствующих частей линии относительно точки x и в целом для ВЛ;

$\boldsymbol{M}_{\text{ш}i} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{A}_{\text{ш}i} & \boldsymbol{B}_{\text{ш}i} \\ \boldsymbol{C}_{\text{ш}i} & \boldsymbol{D}_{\text{ш}i} \end{vmatrix}$ – фазная матрица для соответствующих шагов транспозиции;

где $A_{\text{ш}i} = \begin{bmatrix} A_{\text{ш}ia} & A_{\text{ш}iab} & A_{\text{ш}iac} \\ A_{\text{ш}iba} & A_{\text{ш}ib} & A_{\text{ш}ibc} \\ A_{\text{ш}ica} & A_{\text{ш}icb} & A_{\text{ш}ic} \end{bmatrix}$, $B_{\text{ш}i} = \begin{bmatrix} B_{\text{ш}ia} & B_{\text{ш}iab} & B_{\text{ш}iac} \\ B_{\text{ш}iba} & B_{\text{ш}ib} & B_{\text{ш}ibc} \\ B_{\text{ш}ica} & B_{\text{ш}icb} & B_{\text{ш}ic} \end{bmatrix}$,

$C_{\text{ш}i} = \begin{bmatrix} C_{\text{ш}ia} & C_{\text{ш}iab} & C_{\text{ш}iac} \\ C_{\text{ш}iba} & C_{\text{ш}ib} & C_{\text{ш}ibc} \\ C_{\text{ш}ica} & C_{\text{ш}icb} & C_{\text{ш}ic} \end{bmatrix}$, $D_{\text{ш}i} = \begin{bmatrix} D_{\text{ш}ia} & D_{\text{ш}iab} & D_{\text{ш}iac} \\ D_{\text{ш}iba} & D_{\text{ш}ib} & D_{\text{ш}ibc} \\ D_{\text{ш}ica} & D_{\text{ш}icb} & D_{\text{ш}ic} \end{bmatrix}$ – матричные фазные коэффициенты для i-го шага транспозиции.

Транспонированная линия моделируется с помощью полной матрицы транспозиции

$$\boldsymbol{M}_{T} = \begin{vmatrix} T & 0_3 \\ 0_3 & T \end{vmatrix}, \tag{4}$$

где $T = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$ – матрица транспозиции, $0_3 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ – нулевая матрица третьего порядка.

При этом вектор-столбцы ЭДС по концам линии даны как

$$\dot{\boldsymbol{E}}_1 = \begin{vmatrix} \dot{E}_{1a} \\ \dot{E}_{1b} \\ \dot{E}_{1c} \end{vmatrix}, \quad \dot{\boldsymbol{E}}_2 = \begin{vmatrix} \dot{E}_{2a} \\ \dot{E}_{2b} \\ \dot{E}_{2c} \end{vmatrix}. \tag{5}$$

Полагая для аварийной фазы $\dot{E}_{1\nu} = 0$, $\dot{E}_{2\nu} = 0$, где $\nu = a, b, c$, найдем из (2) искомое распределение ВН в аварийной фазе. Входное сопротивление схемы относительно места дуги определяется соотношением

$$Z_{x\,\text{вх}} = \frac{Z_x Z_{\ell - x}}{Z_x + Z_{\ell - x}}, \tag{6}$$

где Z_x, $Z_{\ell - x}$ – входные сопротивления соответствующих секций линии относительно месторасположения дуги. Входные сопротивления соответствующих участков линии могут быть с достаточной степенью точности найдены в предположении идеально транспонированной линии:

$$Z_x = i\frac{2Z_w \sin\beta x + Z_{wo}\sin\beta_o x}{2\cos\beta x + \cos\beta_o x},$$

$$Z_{\ell - x} = i\frac{2Z_w \sin\beta(\ell - x) + Z_{wo}\sin\beta_o(\ell - x)}{2\cos\beta(\ell - x) + \cos\beta_o(\ell - x)}, \tag{7}$$

где Z_w, Z_{wo} – волновые сопротивления ВЛ по каналам прямой и нулевой последовательности; β, β_o – коэффициенты фазы ВЛ по каналам прямой и нулевой последовательности.

Режиму ОАПВ с АШФ при отсутствии дуги на линии и после расшунтирования аварийной фазы соответствует расчетная схема на рис. 3, *б*, матрица параметров которой соответственно равна

$$\boldsymbol{M} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{C} & \boldsymbol{D} \end{vmatrix} = \boldsymbol{M}_{\text{к}}\boldsymbol{M}_{p1}\boldsymbol{M}_{\ell}\boldsymbol{M}_{p2}\boldsymbol{M}_{\text{к}}. \tag{8}$$

В это соотношение входят полные фазные матрицы шунтирующих реакторов $\boldsymbol{M}_{p1}$, $\boldsymbol{M}_{p2}$ и полная матрица коммутации $\boldsymbol{M}_{\text{к}}$, которая моделирует состояния выключателей по концам линии.

Полная фазная матрица шунтирующего реактора имеет вид

$$\boldsymbol{M}_p = \begin{vmatrix} \boldsymbol{1}_3 & \boldsymbol{0}_3 \\ \boldsymbol{Y}_p & \boldsymbol{1}_3 \end{vmatrix}, \tag{9}$$

где $\mathbf{Y}_p = \begin{vmatrix} Y_p & 0 & 0 \\ 0 & Y_p & 0 \\ 0 & 0 & Y_p \end{vmatrix}$ – фазная матрица шунтирующего реактора; $\boldsymbol{1}_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – единичная матрица третьего порядка.

Фазные напряжения по концам линии определяются следующими выражениями:

$$\dot{\boldsymbol{U}}_1 = \boldsymbol{B}_{1r} \cdot \boldsymbol{B}^{-1}\dot{\boldsymbol{E}}_1 + \boldsymbol{R}_k (\boldsymbol{B}^{-1})^T \dot{\boldsymbol{E}}_2$$

$$\dot{\boldsymbol{U}}_2 = \mathbf{R}_k \cdot \boldsymbol{B}^{-1}\dot{\boldsymbol{E}}_1 + \boldsymbol{B}_{s2} (\boldsymbol{B}^{-1})^T \dot{\boldsymbol{E}}_2, \qquad (10)$$

где $(B^{-1})^T$ – транспонированный матричный фазный коэффициент от матричного фазного коэффициента B^{-1}; $\boldsymbol{R}_{\mathbf{к}} = \begin{vmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{vmatrix}$ – матрица коммутации.

Матричные фазные коэффициенты для соответствующих частей линии относительно ее концов определяются из соотношений

$$\boldsymbol{M}_{1r} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{A}_{1r} & \boldsymbol{B}_{1r} \\ \boldsymbol{C}_{1r} & \boldsymbol{D}_{1r} \end{vmatrix} = \boldsymbol{M}_{p1} \cdot \boldsymbol{M}_{\ell} \cdot \boldsymbol{M}_{p2} \cdot \boldsymbol{M}_{\mathbf{к}}, \qquad (11)$$

$$\boldsymbol{M}_{s2} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{A}_{s2} & \boldsymbol{B}_{s2} \\ \boldsymbol{C}_{s2} & \boldsymbol{D}_{s2} \end{vmatrix} = \boldsymbol{M}_{\mathbf{к}} \cdot \boldsymbol{M}_{p1} \cdot \boldsymbol{M}_{\ell} \cdot \boldsymbol{M}_{p2}.$$

3. АНАЛИЗ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ВТОРИЧНЫХ ТОКОВ ДУГИ ПРИ РЕАЛЬНОЙ ТРАНСПОЗИЦИИ ЛИНИЙ

На основе приведенного выше алгоритма проанализируем условия гашения вторичной дуги при ОАПВ с АШФ в линиях 500 и 750 кВ при их длине 300 и 500 км. Забегая вперед, отметим, что наиболее неблагоприятные условия возникают на фазах, которые занимают крайние положения на среднем шаге транспозиции. В дальнейшем эти две фазы будем называть критичными, а третью фазу, занимающую срединное положение на среднем шаге транспозиции, некритичной. При этом максимальные ВН имеют место на границах среднего и крайних шагов.

Вторичные токи дуги зависят от сопротивления вторичной дуги, которое является нелинейной функцией ВТД. Воспользовавшись моделью дуги, приведенной в [15, 16], сопротивление дуги можно аппроксимировать следующим выражением:

$$R_{\text{д}}(I_{\text{д}}) = \frac{A}{I_{\text{д}}^{\alpha}}, \qquad (12)$$

где $\alpha = 1{,}4$, $A \approx 3{,}5 \cdot 10^5$ для ВЛ 500 кВ и $A \approx 5 \cdot 10^5$ для ВЛ 750 кВ. На рис. 4 показаны эти зависимости. На этом же рисунке приведены данные эксперимента в ВЛ 750 кВ , которые подтверждают общий характер зависимостей, но дают более высокие значения сопротивлений вторичной дуги.

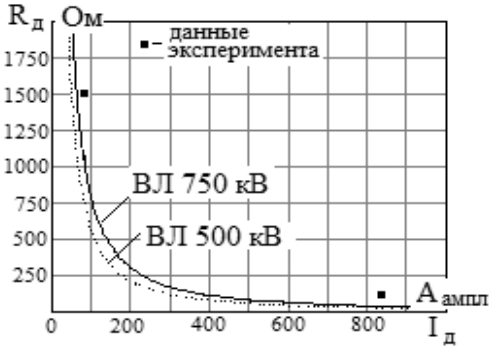


Рис. 4. Зависимость сопротивления вторичной дуги от тока (амплитудное значение) дуги для ВЛ 500 и 750 кВ

Fig. 4. Dependence of the secondary arc resistance on current (an amplitude value) for AL 500 and 750 kV

При оценке эффективности осуществления ОАПВ возникает вопрос, каким сопротивлением следует учитывать вторичную дугу. В режиме ОКЗ, когда ток составляет десятки килоампер, сопротивление первичной дуги не превышает 10 Ом. При отключении аварийной фазы токи дуги быстро затухают (за 4–5 периодов), сопротивления дуги применительно к критичным фазам приведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Сопротивления вторичной дуги при $\delta = \lambda$

Resistances of e secondary arc with $\delta = \lambda$

Номинальное напряжение, кВ	Длина линии, км	Сопротивление вторичной дуги, Ом
500	300	1150
	500	500
750	300	1050
	500	400

Однако следует иметь в виду, что эти сопротивления дуги соответствуют режиму ОАПВ без АШФ. После АШФ ВТД заметно снижается, и поэтому в общем случае следует уточнять сопротивление дуги в соответствии с измененным током. Если при АШФ ВТД не превышает 15…20 А, что соответствует минимально реализуемой паузе ОАПВ, то нет необходимости уточнять сопротивление дуги. В том случае, когда при АШФ ВТД, полученный на основе сопротивлений дуги в табл. 3, превышает 20 А, сопротивление дуги уточняется согласно выражению (12) с использованием полученного значения ВТД. И уже на основе этого сопротивления дуги определяется вторичный ток дуги для оценки условий гашения дуги в соответствующем режиме.

ВЛ 500 кВ, 300 км. На рис. 5 дано распределение ВН в режиме АШФ при идеальной и реальной транспозициях при предельных углах отклонения

между векторами напряжений по концам линии. В случае реальной транспозиции распределение ВН зависит от того, в какой фазе осуществляется АШФ. Как видно из этого рисунка, при учете реальной транспозиции максимальные ВН превосходят в несколько раз таковые в случае, когда ВЛ представляется как идеально транспонированная.

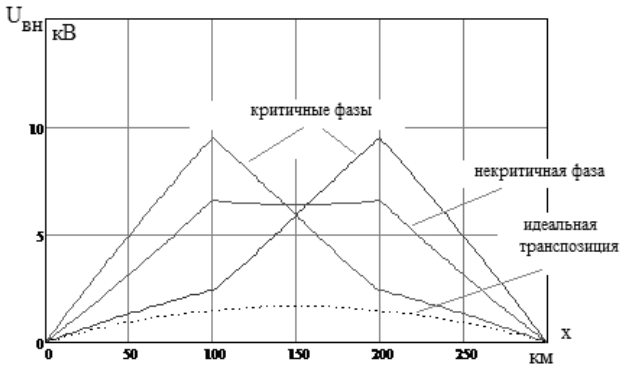


Рис. 5. Распределение ВН в аварийной фазе в режиме АШФ при ВЛ 500 кВ, 300 км

Fig. 5. Distribution of RV in the breakdown phase in the APS mode with AL 500 kV, 300 km

С учетом сопротивления дуги, приведенного в табл. 3, на рис. 6 показано распределение ВТД в режиме АШФ в зависимости от местонахождения дуги.

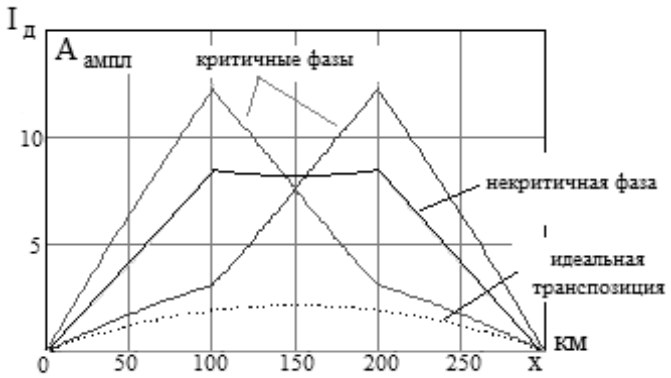


Рис. 6. ВТД (амплитудное значение) в режиме АШФ в зависимости от места аварии при ВЛ 500 кВ, 300 км

Fig. 6. VTD (an amplitude value*)* in the APS mode depending on the place breakdown with AL 500 kV, 300 km

Максимальные значения токов дуги в линиях с реальной транспозицией, так же как и ВН, имеют место в фазах, которые занимают крайние положения на среднем шаге.

На величину ВН и ВТД при реальной транспозиции существенное влияние оказывает угол δ между векторами концевых напряжений, который уве-

личивается в процессе динамического перехода. На рис. 7 показано увеличение максимального тока дуги с ростом углового сдвига. Как видно, даже при маловероятных углах расхождения ток дуги находится в пределах 20 А.

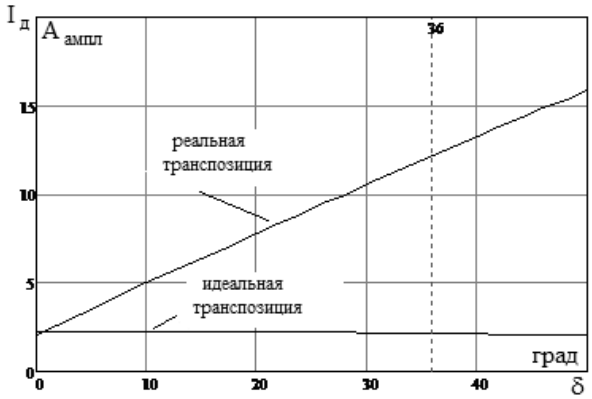


Рис. 7. Зависимость максимальных токов дуги от углового сдвига между напряжениями по концам линии

Fig. 7. Dependence of maximum arc currents on the angular shift between voltages at the line ends

При амплитудных значениях ВТД, не превышающих 20 А, пауза ОАПВ может составлять 0,5 с.

Оценка ВН после расшунтирования аварийной фазы показала, что наибольшие ВН имеют место, когда авария происходит на фазе, занимающей срединное положение на среднем шаге транспозиции. В табл. 4 приведены соответствующие данные при $\delta = 2\lambda$. Как видно из этой таблицы, наибольшие ВН меньше допустимого уровня $U_{0,15доп} = 240$ кВ при любом числе подключенных ШР.

Таблица 4

Table 4

Наибольшие ВН при расшунтировании аварийной фазы при ВЛ 500 кВ, 300 км

Maximal RVs with shunt circuit removal with AL 500 kV, 300 km

Количество шунтирующих реакторов		ВН на аварийной фазе, кВ	
Начало ВЛ	Конец ВЛ	Начало ВЛ	Конец ВЛ
1	1	163	163
0	1	131	148
0	0	55	55

ВЛ 500 кВ, 500 км. На рис. 8 показано распределение ВН вдоль линии в режиме АШФ. И, как было отмечено выше, в случае реальной транспозиции ВН зависит от того, в какой фазе осуществляется АШФ.

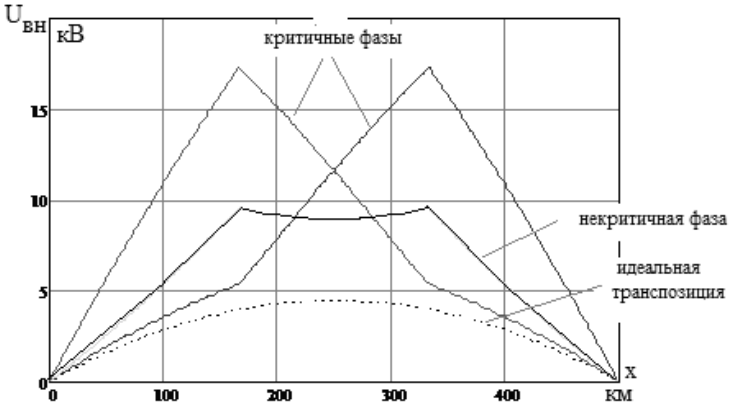


Рис. 8. Распределение ВН вдоль аварийной фазы
в режиме АШФ при ВЛ 500 кВ, 500 км

Fig. 8. Distribution of RV along a breakdown phase
in the APS mode with AL 500 kV, 500 km

Максимальные ВТД при учете дуги с сопротивлением, приведенным в табл. 3, составляет порядка 40 А. Соответственно уточненное сопротивление дуги при таком токе оценивается величиной 2000 Ом. На рис. 9 приведено распределение ВТД в режиме АШФ в зависимости от месторасположения дуги при уточненном сопротивлении дуги. ВТД при предельных углах отклонения не превышает 15 А, и соответственно пауза ОАПВ может составлять 0,5 с.

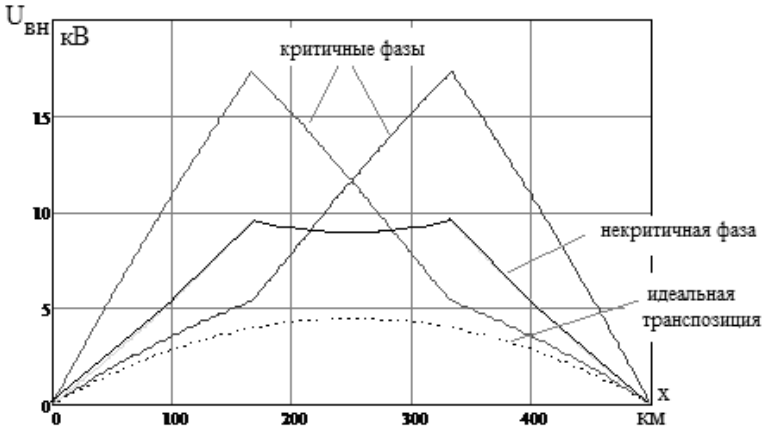


Рис. 9. ВТД в режиме АШФ в зависимости от места аварии
при ВЛ 500 кВ, 500 км

Fig. 9. SAC in the APS mode depending on the place of breakdown
with AL 500 kV, 500 km

В табл. 5 приведены ВН после расшунтирования аварийной фазы при $\delta = 2\lambda$. Оценка ВН после расшунтирования аварийной фазы показала, что при наличии на линии трех ШР имеют место наибольшие ВН, существенно превышающие допустимый уровень: $U_{0,15\text{доп}} = 240$ кВ. Поэтому при осуществлении ОАПВ с АШФ схема с тремя ШР на ВЛ должна исключаться.

Таблица 5

Table 5

Наибольшие ВН при расшунтировании аварийной фазы при ВЛ 500 кВ, 500 км

Maximal RVs with shunt circuit removal of a breakdown phase with AL 500 kV, 500 km

Количество шунтирующих реакторов		ВН на аварийной фазе, кВ	
Начало ВЛ	Конец ВЛ	Начало ВЛ	Конец ВЛ
2	1	379	435
1	1	202	202
0	1	80	106
0	0	70	70

ВЛ 750 кВ, 300 км. Проведенные расчеты показывают (рис. 10), что ВН в паузу АШФ не превышают 15 кВ.

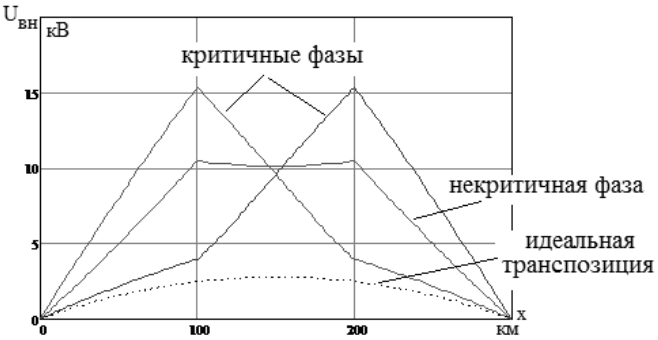


Рис. 10. Распределение ВН вдоль аварийной фазы в режиме АШФ при ВЛ 750 кВ, 300 км

Fig. 10. Distribution of RV along a breakdown phase in the APS mode with AL 750 kV, 300 km

Вторичные токи дуги, как это видно из рис. 11, при предельных углах отклонения оказываются порядка 20А, что гарантирует успешное гашение дуги при паузе АШФ 0,5 с.

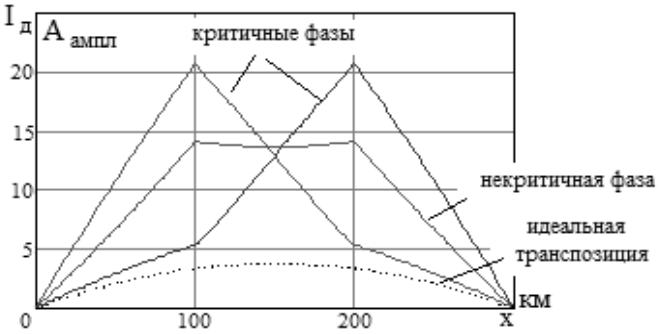


Рис. 11. ВТД в режиме АШФ в зависимости от места аварии при ВЛ 750 кВ, 300 км

Fig. 11. SAC in the APS mode depending on the place of breakdown with AL 750 kV, 300 km

Оценка ВН после расшунтирования аварийной фазы показала, что при наличии на линии обоих ШР имеет место резонансный режим (табл. 6), когда наибольшие ВН существенно превышают допустимый уровень $U_{0,15доп} = 350$ кВ. Поэтому при осуществлении ОАПВ с АШФ схема с двумя ШР на ВЛ должна исключаться.

Таблица 6

Table 6

Наибольшие ВН при расшунтировании аварийной фазы при ВЛ 750 кВ, 300 км

Maximal RVs with shunt circuit removal of a breakdown phase with AL 750 kV, 300 km

Количество шунтирующих реакторов		ВН на аварийной фазе, кВ	
Начало ВЛ	Конец ВЛ	Начало ВЛ	Конец ВЛ
1	1	1148	1148
0	1	117	141
0	0	76	76

ВЛ 750 кВ, 500 км. ВН в этой схеме при АШФ не превышает 30 кВ (рис. 12).

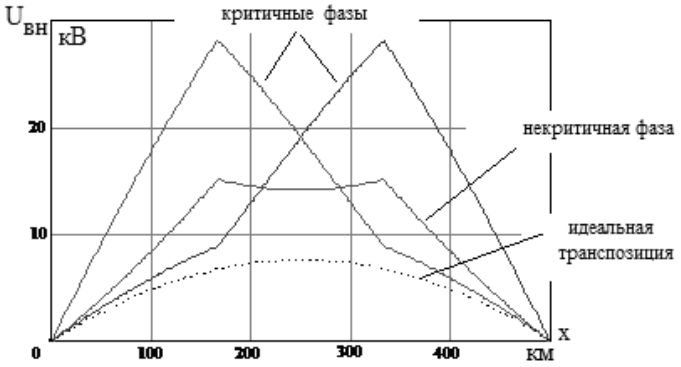


Рис. 12. Распределение ВН вдоль аварийной фазы в режиме АШФ при ВЛ 750 кВ, 500 км

Fig. 12. Distribution of RV along a breakdown phase in the APS mode with AL 750 kV, 500 km

При учете вторичной дуги сопротивлением, приведенным в табл. 3, расчет ВТД дал величину 66 А. Уточненное сопротивление вторичной дуги в данном случае составляет порядка 1400 Ом. Как следует из рис. 13, ВТД при предельных углах отклонения оказываются не более 30А, что гарантирует успешное гашение дуги при паузе ОАПВ не более 0,7 с.

В табл. 7 приведены ВН после расшунтирования аварийной фазы при углах $\delta = 2\lambda$. Как видно из этой таблицы, при наличии на линии трех ШР имеют место наибольшие ВН, превышающие допустимый уровень: $U_{0,15доп} = 350$ кВ. Поэтому при осуществлении ОАПВ с АШФ схема с тремя ШР на ВЛ должна исключаться.

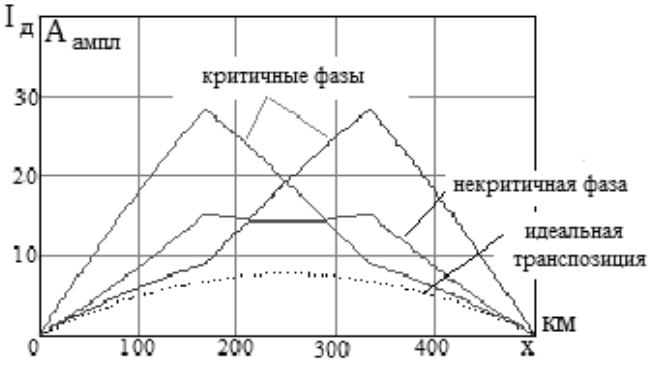


Рис. 13 ВТД в режиме АШФ в зависимости от места аварии при ВЛ 750 кВ, 500 км

*Fig. 13. SAC i*n the APS mode depending on the place of breakdown with AL 750 kV, 500 km

Таблица 7

Table 7

Наибольшие ВН при расшунтировании аварийной фазы при ВЛ 750 кВ, 500 км

Maximal RVs with shunt circuit removal of a breakdown phase with AL 750 kV, 500 km

Количество шунтирующих реакторов		ВН на аварийной фазе, кВ	
Начало ВЛ	Конец ВЛ	Начало ВЛ	Конец ВЛ
2	1	401	378
1	1	160	160
0	1	100	132
0	0	99	99

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье предлагается алгоритм для анализа ОАПВ в транспонированных линиях СВН с использованием автоматического шунтирования фазы. Разработанный алгоритм позволяет определить ВН и ВТД вдоль аварийных фаз с учетом их положения в схеме транспозиции при горизонтальном расположении фаз.

На основе этого алгоритма анализируются условия гашения вторичной дуги в линиях 500 и 750 кВ при их длине 300 и 500 км. Расчеты показали, что моделирование линии как идеально транспонированной дает результаты далеко от истинных результатов, полученных с учетом реальной транспозиции, когда на каждом транспозиционном шаге линия характеризуется несимметрией параметров.

В случае реальной транспозиции ВН и ВТД зависят от того, в какой фазе выполняется ОАПВ. Максимальные ВН и ВТД при реальной транспозиции превосходят в 2,5…7,0 раз соответствующие величины в случае, когда линия представляется как идеально транспонированная. Наиболее неблагоприятные условия возникают в фазах, которые занимают крайние положения на среднем шаге транспозиции.

Главный результат работы состоит в том, что учет реальной транспозиции линии при оценке реализации ОАПВ является обязательным условием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г.* Способы ликвидации однофазных коротких замыканий в воздушных линиях сверхвысокого напряжения // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 116–130.

2. *Kimbark W.* Supression of ground-fault arcs on single-pole switched EHV lines by shunt reactors // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – 1964. – Vo1. 83. – P. 285–290.

3. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / под ред. М.Л. Левинштейна. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.

4. *Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г.* Сравнительный анализ путей ликвидации неустойчивых однофазных коротких замыканий в нетранспонированных линиях СВН и УВН // Электричество. – 2017. – № 11. – С. 22–29.

5. *Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г.* Влияние длительности паузы ОАПВ на пропускную способность электропередачи по условию динамической устойчивости // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 2. – С. 163–176.

6. *Peterson H.A., David N.V.* A method for reducing dead time for single-phase reclosing in EHV transmision // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – 1969. – Vol. PAS-88, iss. 4. – P. 286–292.

7. *Джононаев С.Г.* О влиянии различных факторов на восстанавливавшие напряжения и вторичный ток дуга при однофазном автоматическом повторном включении воздушной линии сверхвысокого напряжения // Материалы IV Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы», ТПУ, Томск, 10–14 октября 2016 г: в 3 т. – Томск, 2016. – Т. 3. – С. 9–19.

8. *Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г.* Влияние продолжительности паузы ОАПВ на пропускную способность электропередачи // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай. – Чолпон-Ата, 2017. – Вып. 68: Исследование и обеспечение надежности систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2017. – С. 112–120.

9. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1993. – 560 с.

10. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России: теоретические и практические вопросы. В 3 т. Т. 1 / под общ. ред. А.Ф. Дьякова. – М.: «Энергопрогресс» Корпорация «ЕЭЭК», 2012. – 696 с.

11. Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines. IEEE Committee Report // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, N 1. – P. 182–192

12. *Ахьёев Дж.С., Киргизов А.К., Ядагаев Э.Г.* Нечеткие модели распределенной генерации возобновляемых источников энергии Республики Таджикистан // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 3 (64). – С. 117–131.

13. The application of high-speed grounding switches for single-pole reclosing on 500-kV power system / R.M. Hasibar, A.C. Legate, J.H. Brunke, W.G. Peterson // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – 1981. – Vo1. PAS-100, iss. 4. – P. 1512–1515.

14. *Красильникова Т.Г., Манусов В.З.* Анализ токов дуги подпитки в паузу ОАПВ в процессе динамического перехода // Научные проблемы транспорта Сибири и дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 313–316.

15. *Рашкес В.С.* Обобщение эксплуатационных данных эффективности ОАПВ ВЛ СВН и опытных данных времени гашения дуги подпитки // Электрические станции. – 1989. – № 3. – С. 65–72.

16. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

Джононаев Сайёд Гулмуродович, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – способы ликвидации повреждений в воздушной линии сверхвысокого напряжения. Имеет 9 публикаций. E-mail: jononaev.87@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-157-174

Elimination of unstable single-phase short-circuits in transposed lines in the SPAR cycle using automatic phase shunting[*]

S.G. JONONAEV

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

jononaev.87@mail.ru

Abstract

The paper discusses the implementation of a single-phase auto-reclosing (SPAR) using automatic phase shunting in transposed lines. It is proved that to take into account real transposition in the calculation of recovery voltages (RV) and secondary arc currents (SAC) is a prerequisite. On the basis of the algorithm, the conditions for quenching the secondary arc are analyzed for SPAR with the use of APS in 500 kV and 750 kV lines with their lengths of 300 and 500 km. Typically, a transposition of phases consisting of three steps of transposition is used in long lines. When estimating RV and SAC, such lines are usually taken to be perfectly transposed, that is, having the symmetry of phase and interphase parameters. This paper proves that taking into account real transposition in assessing the effectiveness of the use of single-phase auto-reclosing (SPAR) is a prerequisite. In the case of real transposition RV and SAC depend on what phase is SPAR performed. The maximum recovery voltages (RV) and secondary arc currents (SAC) for real transposition exceed the corresponding values by 2.5-7.0 times in the case when the line is represented as ideally transposed. The most unfavorable conditions arise in phases that occupy extreme positions at the middle step of transposition. The SPAR application gives the greatest effect if the pause duration is 0,5-1,0 sec, which requires limiting the secondary arc current to 20-45 A (an amplitude value). With a pause of more than 1.5-2.0 sec its duration does not significantly affect the throughput by condition of dynamic stability.

Keywords: single-phase auto-reclosing (SPAR), automatic phase shunting, one-phase short circuit, recovery voltage, secondary arc current, perfectly transposed line, pause (SPAR), critical phases, phase disconnection, elimination of unstable one-phase short circuit, surge arrester (SA), shunt reactors

REFERENCES

1. Krasil'nikova T.G., Dzhononaev S.G. Sposoby likvidatsii odnofaznykh korotkikh zamykanii v vozdushnykh liniyakh sverkhvysokogo napryazheniya [The methods of liquidation single-phase short circuit in the aerial lines of extra-high voltage]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (84), pp. 116–130.

2. Kimbark W. Supression of ground-fault arcs on single-pole switched EHV lines by shunt reactors. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 1964, vo1. 83, pp. 285–290.

3. Levinshtein M.L., ed. *Protsessy pri odnofaznom avtomaticheskom povtornom vklyuchenii linii vysokikh napryazhenii* [The processes of high voltage lines at single-phase auto-reclosing]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 256 p.

4. Krasil'nikova T.G., Dzhononaev S.G. Sravnitel'nyi analiz putei likvidatsii neustoichivykh odnofaznykh korotkikh zamykanii v netransponirovannykh liniyakh SVN i UVN [Comparative analysis of ways to eliminate unstable single-phase short circuits in non-transposed lines of EHV and UHV]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2017, no. 11, pp. 22–29.

5. Krasil'nikova T.G., Dzhononaev S.G. Vliyanie dlitel'nosti pauzy OAPV na propusknuyu sposobnost' elektroperedachi po usloviyu dinamicheskoi ustoichivosti [The effect of single-phase auto-reclosing pause duration on the power transmission throughput under dynamic stability]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 2 (67), pp. 163–176.

[*] *Received 12 March 2018.*

6. Peterson H.A., David N.V. A Method for reducing dead time for single-phase reclosing in EHV transmision. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 1969, vo1. PAS-88, iss. 4, pp. 286–292.

7. Dzhononaev S.G. [About influence of various factors on the restored tension and the secondary current of an arc at single-phase automatic switching-on of the air line of ultrahigh tension]. *Materialy IV Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma "Intellektual'nye energosistemy"* [Materials of the IV International Youth Forum "Intellectual Energy Systems"], Tomsk, 2016, vol. 3, pp. 9–19. (In Russian).

8. Krasil'nikova T.G., Dzhononaev S.G. Vliyanie prodolzhitel'nosti pauzy OAPV na propusknuyu sposobnost' elektroperedachi [Influence of the duration of the SPAR pause on transmission capacity transmission line]. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki. Vyp. 68. Issledovanie i obespechenie nadezhnosti sistem energetiki* [Methodological issues of reliability research for large energy systems. Iss. 68. Research and ensuring the reliability of energy systems]. Cholpon-Ata, 2017, pp. 112–120.

9. Aleksandrov G.N., ed. *Proektirovanie linii elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [The design of superhigh voltage transmission lines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1993. 560 p.

10. D'yakov A.F., ed. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii: teoreticheskie i prakticheskie voprosy*. V 3 t. T. 1 [The electric networks of super- and ultra-high voltage UES of Russia: theoretical and practical issues. In 3 vol. Vol. 1]. Moscow, "Energoprogress" Corporation "EEEK" Publ., 2012. 696 p.

11. Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines. IEEE Committee Report. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1992, vol. 7, no. 1, pp. 182–192.

12. Ahyoev J.S., Kirgizov A.K., Yadagaev E.G. Nechetkie modeli raspredelennoi generatsii vozobnovlyaemykh istochnikov energii Respubliki Tadzhikistan [A fuzzy model of distributed generation of renewable energy in the Republic of Tajikistan]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (64), pp. 117–131.

13. Hasibar R.M., Legate A.C., Brunke J.H., Peterson W.G. The application of high-speed grounding switches for single-pole reclosing on 500-kV power system. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 1981, vo1. PAS-100, iss. 4, pp. 1512–1515.

14. Krasil'nikova T.G., Manusov V.Z. Analiz tokov dugi podpitki v pauzu OAPV v protsesse dinamicheskogo perekhoda [The analysis of arc seed currents in pause single-phase auto-reclosing in the process of dynamic transition]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2009, no. 1, pp. 313−316.

15. Rashkes V.S. Obobshchenie ekspluatatsionnykh dannykh effektivnosti OAPV VL SVN i opytnykh dannykh vremeni gasheniya dugi podpitki [Generalisatoin of operational data of efficiency SPAR on EHV lines and experimental data of time of secondary arc extinction]. *Elektricheskie stantsii – Power Technology and Engineering*, 1989, no. 3, pp. 65–72. (In Russian).

16. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [The transient electromechanical processes in electrical systems]. 4th ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.

Для цитирования:

Джононаев С.Г. Ликвидация неустойчивых однофазных коротких замыканий в транспонированных линиях в цикле ОАПВ с использованием автоматического шунтирования фазы // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 157–174. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-157-174.

For citation:

Dzhononaev S.G. Likvidatsiya neustoichivykh odnofaznykh korotkikh zamykanii v transponirovannykh liniyakh v tsikle OAPV s ispol'zovaniem avtomaticheskogo shuntirovaniya fazy [Elimination of unstable single-phase short-circuits in transposed lines in the SPAR cycle using automatic phase shunting]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 157–174. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-157-174.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 175–190

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 175–190

ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

УДК 621.311 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-175-190

Исследование оптимальных режимов интеллектуальных сетей с двухсторонним потоком энергии*

В.З. МАНУСОВ[a], Н. ХАСАНЗОДА[b], Ш.А. БОБОЕВ[c]

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

[a] *manusov36@mail.ru* [b] *nasrullo-5445@mail.ru* [c] *shboboev@mail.ru*

Доказана необходимость оптимизации режимов интеллектуальной системы в концепции Smart Grid с функцией двустороннего потока энергии от своих источников распределенной генерации. В связи с этим для активных потребителей введено понятие генерирующего потребителя, что обеспечивает возможность гибко регулировать потоки энергии и выравнивать график нагрузки, а также свести к минимуму финансовые затраты на потребляемую энергию. Введено и обосновано новое понятие – холонический подход – в концепции Smart Grid, а также новый термин «генерирующий потребитель-холон» (ГП-холон), который подразумевает способность электропотребителя самостоятельно генерировать энергию с помощью возобновляемых источников, аккумулировать ее, обмениваться энергией с другими подобными ГП-холонами и основной генерирующей системой. Для построения интеллектуальной сети использована холоническая структура, основанная на совокупности холонов (подсистем). Холоническая структура предполагает подсистемы различной природы, расположенные на разных уровнях агрегирования, состоящие между собой во взаимосвязи, чтобы сформировать иерархию саморегулируемых холонов, которая называется холархией. В соответствии с представлениями Кестлера (A. Koestler) холоны одновременно являются как целым, так и частью. Они в основном автономны, что позволяет им самостоятельно обеспечивать свое существование. Двусторонний поток энергии для холонической структуры предполагает возможность генерации и накопление энергии за счет внутренней структуры электропотребителя. Ключевым моментом в работе является использование собственных ветроресурсов, которые достаточно велики в прибрежной зоне Дальнего Востока и на островах. Разработана новая математическая модель оптимального электропотребления генерирующим потребителем в виде системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) с двусторонним потоком энергии. Разработана система приоритетности выбора источников генерации, обеспечивающая минимизацию материально-финансовых затрат электропотребителя.

Ключевые слова: интеллектуальная сеть, концепция Smart Grid, двусторонний поток энергии, генерирующей потребитель-холон, холархия, возобновляемых источников энергии, ветроэнергетическая станция, аккумулирование энергии, оптимизационная модель

* *Статья получена 06 марта 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетическая система (ЭЭС) России является уникальным организационно-техническим объектом. Однако централизованная система организации и управления ЭЭС нуждается в модернизации и использовании инновационных технологий. В последнее десятилетие в передовых странах мира развивается технология Smart Grid. Этот термин до сих пор не имеет четкого терминологического эквивалента в русском языке. К наиболее распространенным эквивалентным русскоязычным терминам относятся «интеллектуальная сеть энергетики», «интеллектуальная электроэнергетическая система», «активно-адаптивная сеть». В настоящее время имеется множество определений Smart Grid, при этом каждая из сторон-участниц процесса (энергокомпания, энергопотребитель, автоматизации энергообъектов, системные интеграторы и другие) видят в Smart Grid свои функции и задачи [1, 2].

Впервые термин Smart Grid использован авторами S.M Amin и B.F. Wollenberg в их публикации «Toward a Smart Grid» [3]. Применение этого термина за рубежом было связано с чисто рекламными названиями специальных контроллеров, предназначенных для управления режимом работы и синхронизации автономных ветрогенераторов, отличающихся нестабильным напряжением и частотой, с электрической сетью. Затем термин стал применяться для обозначения микропроцессорных счетчиков электроэнергии, способных самостоятельно накапливать, обрабатывать, оценивать информацию и передавать ее по специальным каналам связи и даже через Интернет [4].

Важной особенностью Smart Grid является возможность реализации двусторонних потоков энергии и коммуникативной информации за счет того, что генерирующий потребитель может получать энергию от ЭЭС также от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и накопителя энергии после ее аккумулирования. В этом коренное отличие Smart Grid от традиционных электрических сетей, в которых электроэнергия и поток информации обычно однонаправленный [5, 6]. Электроэнергия генерируется на базе центральной электростанции, а затем проходит через систему передачи и распределительные сети для генерирующих потребителей.

В настоящей работе основное внимание уделено построению системы Smart Grid, обеспечивающей двусторонний поток электрической энергии и коммуникативную информацию между энергообъектами и потребителями за счет применения новейших технологий и инструментов, которые позволяют повысить эффективность работы электросетевого комплекса.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НА ОСНОВЕ ХОЛОНИЧЕСКОГО ПОДХОДА

На основе наблюдений Кестлер [7] придумал слово *holon*, объединив греческое слово *holos*, что означает «целое», и греческий суффикс *on* – «часть». Холон относится к отдельной логической сущности, которая является как целой, так и частью. Холоны в основном автономны, что позволяет им самостоятельно регулировать свое существование. Более того, они взаимодействуют друг с другом и образуют большие холоны на более высоком уровне агрегирования (агрегация). Холоны могут быть повторно организова-

ны на разных уровнях агрегирования, чтобы сформировать иерархию саморегулируемых холонов, которая в этом случае называется holarchy (холархия). Диаграмма, представляющая холархию, показана на рис. 1.

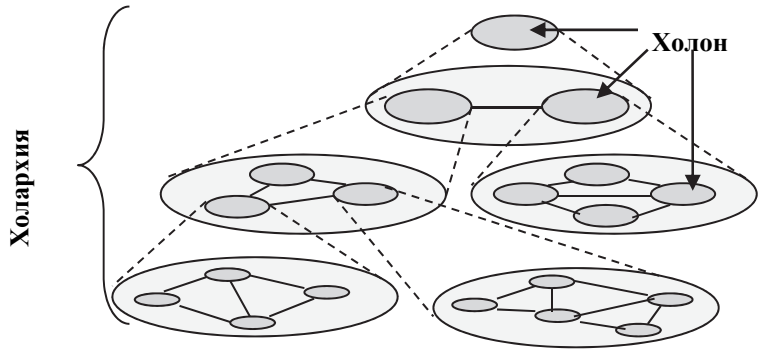


Рис. 1. Холархия как организация холонов

Fig. 1. Holachy as an organization of holons

Функционируя автономно, холон может взаимодействовать с другими холонами в холархии для достижения общих целей. В динамической среде холоны также могут изменять свои свойства. Эти свойства холонической концепции делают ее весьма привлекательной для организации очень сложных систем, в том числе Smart Grid. Автономия холонов способствует распределенному управлению системой, в которой агрегирование отдельных холонов повышает эффективность и качество функционирования системы. Кроме того, с учетом динамической реконфигурации холархия становится более устойчивой к изменениям и адаптируется к своей и внешней среде [8, 9].

Холоническая концепция обладает преимуществом и значительными отличительными особенностями по сравнению с иерархическими и агентскими технологиями. В отличие от холархии, в иерархии степень автономности элемента сильно ограничена из-за отношения ведущего / ведомого, которое существует между слоями объектов [10, 11].

В настоящей работе предлагается новая модель Smart Grid на основе холонической структуры (рис. 2), содержащая три холона высокого уровня, а именно:

1) холон – интеллектуальная энергосистема;

2) холон – информационные технологии;

3) холон – система коммуникации.

Функции холонов высокого уровня заключаются следующем:

– интеллектуальная система обеспечивает надежную и экономичную системы электроснабжения, которая состоит из генерации электроэнергии, передачи электроэнергии на расстояние, распределения мощности и аккумулирования электроэнергии;

– информационные технологии поддерживают технический и коммерческий учеты электроэнергии, интеллектуальный мониторинг счетчиков и соответствующее управление и хранение информации;

– система коммуникация основывается на передовой коммуникационной инфраструктуре и технологиях.

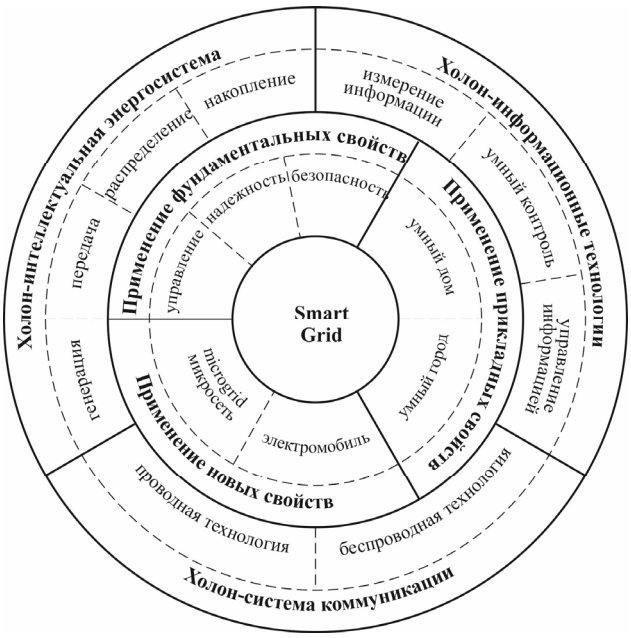


Рис. 2. Инфраструктура интеллектуальной сети
и ее приложения

Fig. 2. The Smart Grid infrastructure and its applications

Например, первый холон содержит холоны более низкого уровня: генерации, передачи, распределения и накопления. Холоны научной природы разделяются на применение фундаментальных свойств, прикладных свойств и новых свойств. Они также содержат свои холоны более низкого уровня.

Функции холонов другой природы заключаются в следующем:

– фундаментальные применения сосредоточены на технологиях управления энергией, надежности системы, безопасности и конфиденциальности, включая управление электропотреблением, повышением энергоэффективности, максимизацию пользовательской полезности и защиту системы;

– прикладные применения могут быть реализованы в качестве двух примеров – это умный дом и умный город, которые подключаются к Smart Grid, оказывая влияние на социальное положение его человеческого сооб-щества;

– новые применения представляют два новых технических решения в Smart Grid: электрический автомобиль и Microgrid с использованием управления энергий для поддержки электромобилей и распределенной генерации возобновляемых источников энергии в Microgrids.

2. ВЕТРОВЫЕ РЕСУРСЫ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Метеорологические данные о скорости ветра на Тихоокеанском побережье России доказывают целесообразность строительства двух ветроэлектростанций (ветропарков) на островах Русский и Попова.

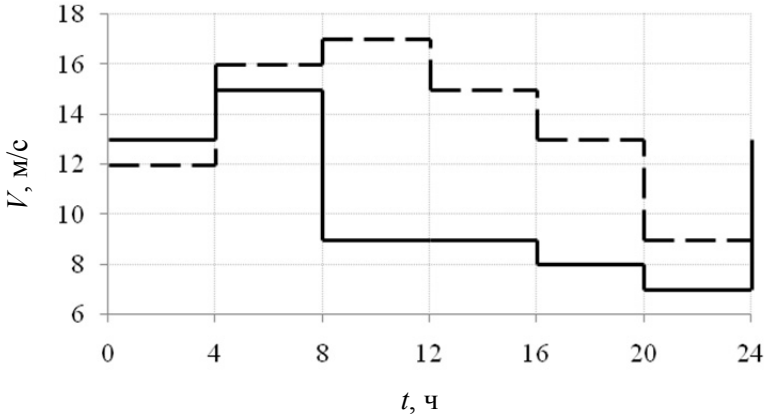


Рис. 3. Скорость ветра на островах Русский (сплошная линия) и Попова (пунктирная линия)

Fig. 3. The wind speed on the Russky (solid line) and Popov (dotted line) islands

Если будут осуществлены планы ОАО «РусГидро» по развитию концепции интеллектуальной сети, то будет предусмотрено строительство Дальневосточной ветроэлектростанции (ВЭС) на островах Русский (до 16 МВт) и Попова (до 20 МВт) [12].

Известно, что мощность на выходе ВЭУ напрямую зависит от скорости ветрового потока, который сильно изменяется во времени, от местной погоды и поверхности местности. Зависимость между скоростью ветра, проходящего через ометаемую площадь установки A (м^2), и мощностью выражается через формулу

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 C_p(\lambda), \tag{1}$$

где ρ – плотность воздушного потока (кг/м^3), зависящая от температуры и давления воздуха; A – площадь, ометаемая лопастями; V – скорость ветра; C_p – коэффициент эффективности ВЭУ; λ – коэффициент быстроходности.

Ометаемая поверхность может быть вычислена по формуле

$$A = \pi R^2, \tag{2}$$

где R – радиус ветроколеса, м.

Из выражения (1) можно заметить, что зависимость между скоростью ветра и мощностью ВЭУ нелинейная и является кубической. В масштабах целого ветрового парка эта взаимосвязь выражается еще сильнее, так как ветропарк представляет собой комплекс ВЭУ и каждая установка использует разные скорости и направления ветра.

Один из простых методов преобразования скорости ветра в мощность – это использование характеристики мощности от производителя конкретной установки. Подобный метод и результаты исследования подробно описаны в работах [13–15]. Необходимо отметить, что данные скорости ветра, получаемые с анемометра на самой установке либо полученные с метеорологической

мачты, установленной на основе ветроэнергетического кадастра, не совсем соответствуют той скорости, которая непосредственно падает в ометаемую площадь установки.

Таким образом, преобразование реальных данных скорости ветра, измеренных в течение года на метеорологической мачте, в скорость ветра, которая соответствует уровню высоты оси ступицы ротора, можно осуществить с помощью методов экстраполяции, например степенного закона

$$V_{\text{с}}(t) = V_{\text{м}}(t)\left(\frac{H}{H_{\text{м}}}\right)^{m}, \tag{3}$$

где $V_{\text{с}}$ – скорость ветра на уровне оси ступицы ротора (м/с); $V_{\text{м}}$ – скорость ветра на уровне метеомачты (м/с); H – высота оси ступицы ротора ВЭУ (для данного типа установки она равна 100 м); $H_{\text{м}}$ – высота метеомачты (10 м); m – коэффициент сезонности, изменяется по временам года: зима – 0.17, весна – 0.12, лето – 0.17, среднегодовой – 0.26.

Необходимо отметить, что в зависимости от условий и ситуации для подобного преобразования скорости ветра из одного уровня в другой может подойти тот или иной метод экстраполяции. При возможности измерить скорость ветра на уровне оси ступицы ротора ВЭУ необходимость в преобразовании отпадает.

После определения скорости ветра следует выполнить ее преобразование в электрическую мощность ВЭУ с помощью характеристики мощности ветроустановки типа WTU 2.0, показанной на рис. 4.

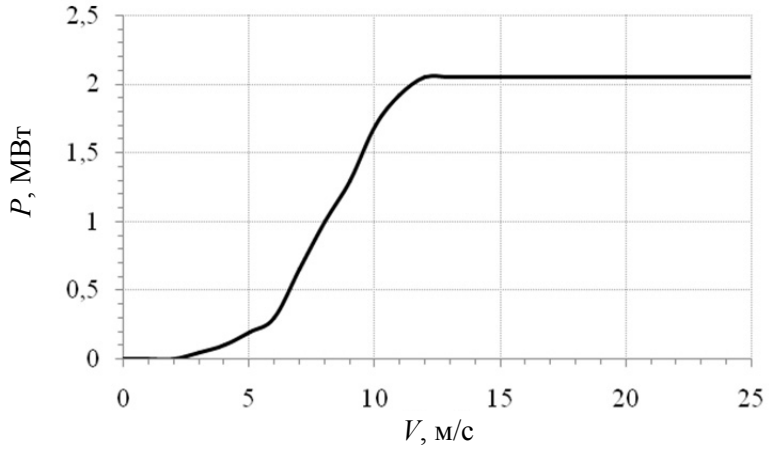


Рис. 4. Характеристика мощности ВЭУ WTU 2,05 МВт

Fig. 4. The power characteristic of WPI WTU of 2.05 MW

Как видно, выработка мощности начинается с отметки скорости ветра в 3 м/с и является стартовой позицией в процессе выработки. В диапазоне скоростей от 3 м/с до 12 м/с идет выработка номинальной мощности. Начиная с 12 м/с до 25 м/с мощность поддерживается на номинальном уровне. Выше последней отметки срабатывает команда отключения установки в целях безопасности. Значения преобразованной мощности ВЭС показано на рис. 5.

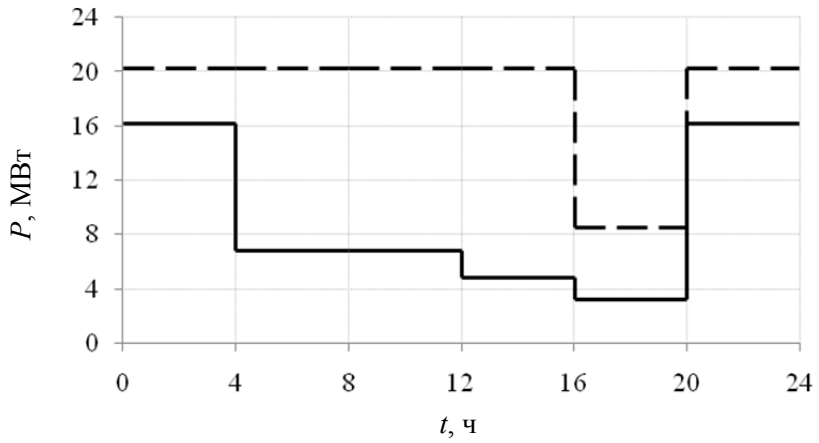


Рис. 5. Суточные графики выдачи мощности ВЭС (сплошная линия – о. Русский и пунктирная линия – о. Попова)

Fig. 5. Daily patterns of the WTU power supply (the solid line shows power supply on the Russky island and the dotted line shows power supply on the Popov island)

Мощность, которую выдает ВЭС острова Попова, стабилизирована на предельной мощности отдельных ВЭУ WTU 2,05 МВт, так как скорость ветра превышает 12 м/с и доходит до 20 м/с. В связи с тем, что электропотребление на острове Попова меньше вырабатываемого, избыточная электроэнергия участвует в обмене в качестве двустороннего потока энергии.

3. АЛГОРИТМ ДОСТИЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

Уравнение баланса для данной системы будет иметь следующий вид

$$P_{\text{ЭС}} + P_{\text{ВЭУ}} \pm P_{\text{ак}} = P_{\text{п}} + \Delta P\,, \tag{4}$$

где $P_{\text{ЭС}}$ – мощность, которую можно закупить в ЭЭС; $P_{\text{ВЭУ}}$ – мощность ВЭУ; $P_{\text{ак}}$ – мощность аккумуляторной батареи; $P_{\text{п}}$ – мощность потребителя; ΔP – потери, кВт.

В интегральной форме

$$\int_0^{24} P_{\text{ЭС}}(t)\,dt + \int_0^{24} P_{\text{ВЭУ}}(t)\,dt \pm \int_0^{24} P_{\text{ак}}(t)\,dt = \int_0^{24} P_{\text{п}}(t)\,dt + \int_0^{24} \Delta P(t)\,dt. \tag{5}$$

В концепции двустороннего потока энергии открывается возможность получения электроэнергии от трех источников: энергосистемы, ВЭУ и накопителя. Стоимости этих видов энергии различны, и, кроме того, они определяется по двум зонам тарифов стоимости энергии энергосистемы. Для этой цели было реализовано программное обеспечение на основе разработанного алгоритма. Данный программный продукт представляет собой систему поддержки принятия решений для минимизации финансовых расходов на по-

требляемую электроэнергию. Эффективность принимаемых решений определяется оптимальным соотношением ее получения от трех указанных видов источников энергии при различных ценах для каждого часа суточного графика нагрузки. Задача является оптимизационной с непредсказуемой в некоторой степени выработкой мощности ВЭУ и заданными ограничениями на возможность аккумулирования энергии накопителям. Результаты расчета приведены ниже.

Примем следующие исходные данные:

- $P_{\text{ГП}}$ – потребляемая мощность острова Русский или острова Попова;
- $P_{\text{ЭС}}$ – передаваемая мощность энергосистемы;
- $P_{\max}^{\text{ВЭУ}}$ – максимально возможная мощность вырабатываемой ВЭУ острова Русский или острова Попова, где $0 \le P_{\max}^{\text{ВЭУ}} \le P_{\text{ном}}^{\text{ВЭУ}}$;
- $P_{\max}^{\text{ак}}$ – максимально передаваемая мощность накопителей острова Русский или острова Попова, где $0 \le P_{\max}^{\text{ак}} \le P_{\text{ном}}^{\text{ак}}$.

Для оптимизации расходов за электроэнергию в течение суток выполняется подбор значений из входного вектора вырабатываемой или передаваемой электроэнергии и умножается на матрицу цен. Основная система уравнений для генерирующего потребителя при двустороннем потоке энергии приведена ниже:

$$\begin{cases} c_{11} \cdot P_{\text{ЭС}} + c_{12} \cdot P_{\text{ВЭУ}} + c_{13} \cdot P_{\text{ак}} = m_1, \\ c_{21} \cdot P_{\text{ЭС}} + c_{22} \cdot P_{\text{ВЭУ}} + c_{23} \cdot P_{\text{ак}} = m_2, \\ c_{31} \cdot P_{\text{ЭС}} + c_{32} \cdot P_{\text{ВЭУ}} + c_{33} \cdot P_{\text{ак}} = m_3, \end{cases} \tag{6}$$

где m_i, $i = \overline{1,3}$ – суммарные результаты умножения каждой строки, $\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}$ – матрица цен.

Решение системы линейных алгебраических уравнений на каждом шаге итерации решается методом исключения Гаусса. Прямой ход состоит в обнулении поддиагональных элементов, а обратный ход состоит в решении уравнений с верхней треугольной матрицей, причем первым находится последнее по номеру неизвестное.

Матрица цен представляет собой диагональную матрицу вида

$$\begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{pmatrix}, \tag{7}$$

где c_{11} – цена электроэнергии за 1 кВт/ч из энергосистемы; c_{22} – цена электроэнергии за 1 кВт/ч из ВЭС; c_{33} – цена электроэнергии за 1 кВт/ч из накопителя энергии.

Задача минимизации расходов решается по заданной модели

$$\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3} C_{ij}P_j = M \to \min , \qquad (8)$$

где C – матрица цен; P – вектор расходов электроэнергии, состоящий из $(P_{\text{ЭС}}, P_{\text{ВЭУ}}, P_{\text{ак}})^T$ элементов; M – суммарный результат $M = \sum_{i=1}^{3} m_i$.

Во время подбора значений вырабатываемой или передаваемой электроэнергии из входного вектора обязательно должны выполняться следующие ограничения:

$$0 \le P_{\text{ЭС}} \le P_{\text{ч,max}}^{\text{ГП}}; \quad 0 \le P_{\text{ВЭУ}} \le P_{\text{ч,max}}^{\text{ВЭУ}}; \quad 0 \le P_{\text{ак}} \le P_{\text{ч,max}}^{\text{ак}}.$$

Разработан алгоритм решения поставленной задачи, и на его основе осуществлена программная реализация на языке Delphi. Скриншот программы представлен на рис. 6.

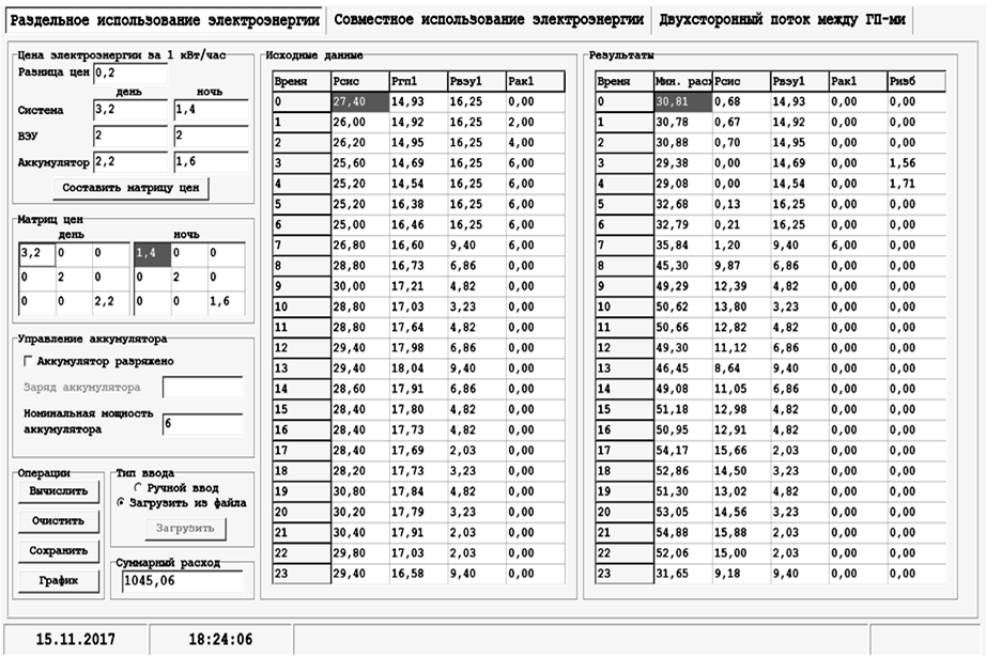


Рис. 6. Внешний вид разработанной программы

Fig. 6. The design of the developed program

В качестве контрольного расчета выбран суточный график электропотребления одного из дней осеннего периода с учетом возможной генерации ВЭС и аккумулирования энергии. Из приведенных графиков на рис. 7, *а* видно, что при двухзонном тарифе стоимости электроэнергии от энергосистемы, когда дневной тариф действует с 7 часов до 23 часов, а ночной сниженный

тариф – с 23 часов до 7 часов, оптимальное электропотребление складывается следующим образом:

– аккумулирование энергии необходимо осуществлять при льготном тарифе и во время избытка энергии от ВЭС;

– в период льготного тарифа при нехватке энергии у ГП получать и/или аккумулировать энергию от энергосистемы;

– в период дневного тарифа при нехватке энергии у ГП получать от накопителя и энергосистемы;

– во всех периодах ночного и дневного тарифов предпочтение отдается генерации от ВЭС.

С помощью решения оптимизационной задачи минимизируются финансовые затраты от всех источников генерации за каждый час суточного графика и в целом на суточном времени. График минимальных финансовых затрат за сутки представлен на рис. 7, *б*.

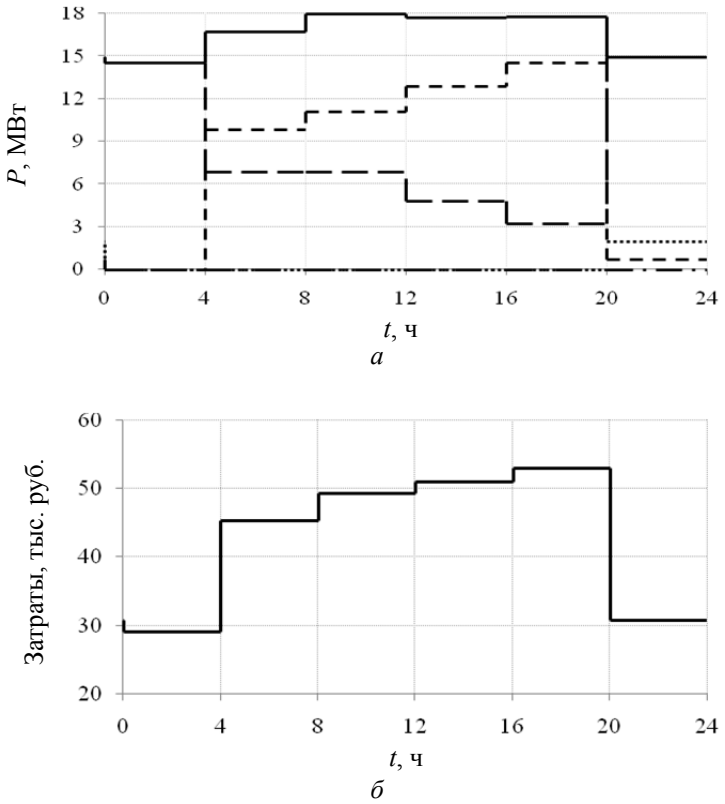


Рис. 7. Одновременное использование электроэнергии всех видов:

а – распределение мощности в $ГП_1$ (——— – $P_{нагр}$, ... – $P_{накоп}$, - - - - - – $P_{ЭС}$, — — — - – $P_{ВЭУ}$ и — · — · — – $P_{ак}$); *б* – минимальная расход $ГП_1$

Fig. 7. Simultaneous energy consumption of all types:

a) power distribution in PG1 (——— – P_{load}, ... – P_{accum}, - - - - - – P_{PG}, — — — - – P_{WG} and — · — · — – P_{ab}); *b*) minimal power consumption from LRS_1

Для условий, когда подключен $ГП_2$ (остров Попов) со своей ВЭС мощностью до 20 МВт, возникает возможность не только минимизации расходов за электроэнергию, но и продажи электроэнергии в энергосистему или осуществления взаимовыгодного обмена энергией между генерирующими потребителями (ГП-холонами).

В табл. 1 представлены условия энергетического баланса на суточном интервале с дискретностью четыре часа для генерирующего потребителя – острова Русский. Видно, что заряд аккумулятора целесообразно проводить в начале суток. Использование энергии ветра необходимо осуществлять в утренний и вечерний максимумы (8 и 20 часов), чтобы не покупать энергию из энергосистемы. Наряду с этим активный потребитель ($ГП_1$) сам может поставлять избыточную энергию в энергосистему.

Таблица 1

Table 1

Электропотребление мощности острова Русский ($ГП_1$), МВт

Power consumption of Russky island (LRS_1), MW

Время суток, часы	0	4	8	12	16	20	24
$P_{наг}$	14,93	14,54	16,73	17,98	17,73	17,79	14,93
$P_{ак1}$	2	0	0	0	0	0	2
$P_{ЭС}$	0	0	0	0	0	9,91	0
$P_{ВЭУ1}$	16,25	14,54	6,86	6,86	4,82	3,23	16,25
$P_{ак1}$	0	0	0	0	0	0	0
$ГП_1 \to ГП_2$	0	0	0	0	0	0	0
$ГП_1 \to ЭС$	0	1,71	0	0	0	0	0
$ГП_2 \to ГП_1$	0,68	0	9,87	11,12	12,91	4,65	0,68

В табл. 2 выполнены аналогичные расчеты для острова Попова ($ГП_2$). Показано, что в связи с незначительной собственной нагрузкой и мощным ветропарком почти всегда имеется избыток энергии за счет ветра, который может быть направлен для потребителя $ГП_1$ и в энергосистему.

Таблица 2

Table 2

Электропотребление мощности острова Попова ($ГП_2$), МВт

Power consumption of Popov island (LRS_2), MW

Время суток, часы	0	4	8	12	16	20	24
$P_{наг}$	3,56	3,27	3,74	3,82	3,69	3,92	3,56
$P_{ак2}$	2	0	0	0	0	0	2
$P_{ЭС}$	0	0	0	0	0	0	0
$P_{ВЭУ2}$	5,56	3,27	3,74	3,82	3,69	3,92	5,56

Окончание табл. 2

End tab. 2

Время суток, часы	0	4	8	12	16	20	24
$P_{ак2}$	0	0	0	0	0	0	0
$ГП_2 \to ГП_1$	0,68	0	9,87	11,12	12,91	4,65	0,68
$ГП_2 \to ЭС$	14,07	17,04	6,7	5,37	3,71	0	14,07
$ГП_1 \to ГП_2$	0	0	0	0	0	0	0

В табл. 3 приведены оптимальные финансовые затраты при покрытии графика нагрузки из всех возможных источников питания, включая возобновляемые источники энергии. Показано, что, несмотря на минимизацию расходов, генерирующий потребитель ($ГП_1$) не получает дополнительных доходов, так как его собственное электропотребление не может быть покрыто даже при двусторонних потоках энергии.

Таблица 3

Table 3

Оптимизация финансовых затрат на электропотребление (тыс. руб.)

Optimization of financial expenses for power consumption (ths rbl)

Время суток, часы	0	4	8	12	16	20	24
Минимальный расход $ГП_1$	32,5	29,08	13,72	13,72	9,64	38,172	32,5
Минимальный расход $ГП_2$	11,12	6,54	7,48	7,64	7,38	7,84	11,12
Максимальный доход $ГП_1$	0	1,539	0	0	0	0	0
Максимальный доход $ГП_2$	13,615	15,336	47,7	47,859	48,747	13,95	13,615
Итого $ГП_1$	–32,5	–27,541	–13,72	–13,72	–9,64	–38,172	–32,5
Итого $ГП_2$	+2,495	+8,796	+40,22	+40,219	+41,367	+6,11	+2,495

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена новая научная концепция организации структуры интеллектуальной сети в технологии Smart Grid, отличающаяся возможностью двустороннего потока энергии для электропотребителя. На этой основе сформулирована идея интеллектуальной системы электроснабжения с реализацией двусторонних потоков энергии и функцией ее аккумулирования в накопителях. Возможность осуществления двусторонних потоков энергии обусловлена тем, что у электропотребителя есть выбор ее получения от трех видов источников: с одной стороны, от энергосистемы, а с другой – от ВИЭ и накопителя.

2. Введено и обосновано новое понятие – холонический подход – в концепции и технологии Smart Grid. Оно предполагает построение общей интеллектуальной системы как совокупности холонов (подсистем) различной природы и состоящих между собой во взаимосвязи. В свою очередь, холоны могут создавать новые объединения путем агрегирования на более высоком уровне. Таким образом, возникает некоторая многоуровневая система иерархической природы. Такая вновь образованная из холонов система названа холархией.

3. Предложена математическая модель для двустороннего потока энергии генерирующего потребителя с учетом ценообразования и тарифов, отличающаяся тем, что она устанавливает гибкие финансовые отношения с интеллектуальной сетью в концепции Smart Grid.

4. Доказана возможность минимизации финансовых затрат при различных соотношениях потребляемой электроэнергии от ЭЭС, ВЭС и накопителя. Алгоритм предусматривает возможность накопления энергии в моменты ночного минимума или избыточный мощности ВЭС. Программный продукт позволяет существенно улучшить концепцию и технологию построения интеллектуальной сети в системе Smart Grid.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tuballa M.L., Abundo M.L.* A review of the development of Smart Grid technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 3. – P. 710–725.

2. *Negeri E., Baken N.* Smart integration of electric vehicles in an energy community // Proceedings of the 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems. – Porto, Portugal, 2012. – P. 25–32.

3. *Amin S.M., Wollenberg B.F.* Toward a Smart Grid // IEEE P&E Magazine. – 2005. – Vol. 3, N 5. – P. 34–41.

4. *Brown R.E.* Impact of Smart Grid on distribution system design // Proceedings of IEEE "Power and Energy Society General Meeting". – Pittsburgh, 2008. – P. 1–4.

5. European Smart Grids technology platform: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future / European Commission Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. – European Union, 2006. – URL: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf (accessed: 17.09.2018).

6. *Манусов В.З., Хасанзода Н.* Холонический подход для интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid при двустороннем потоке энергии // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3–4. – С. 206–211.

7. *Koestler A.* The ghost in the machine. – Repr. ed. – London: Penguin, 1990. – 400 p. – ISBN 0-14-019192-5.

8. *Giret A., Botti V.* Holons and agents // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2004. – Vol. 15, N 5. – P. 645–659.

9. *Manusov V.Z., Khasanzoda N.* The construction of holonic infrastructure of intelligent networks in the Smart Grid concept with a two-way flow of energy // Problems of the Regional Energetics. – 2017. – Vol. 3, N 35. – P. 76–85.

10. *Zhang G., Li W.* Flexible holonic organization modeling and cultural evolution // IEEE 4th International Conference on Wireless Communications. Networking and Mobile Computing. – Dalian, 2008. – P. 202–212.

11. MICROGRIDS – large scale integration of micro-generation to low voltage grids / N. Hatziargyriou, N. Jenkins, G. Strbac, J.A.P. Lopes, J. Ruela, A. Engler // CIGRE 2006. – Paris, France, 2006. – C6-309. – P. 21–28.

12. *Манусов В.З., Хасанзода Н., Ахьёев Дж.С.* Создание интегрированной системы электроснабжения острова Русский и управление ее режимами // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1–2. – С. 142–145.

13. *Grogg K.* Harvesting the wind: the physics of wind turbines. – Carleton College, USA: Northfield, 2005. – 42 p.

14. *Удалов С.Н., Манусов В.З.* Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с.

15. *Удалов С.Н., Манусов В.З., Зубова Н.В.* Управление ветроэнергетической установкой с изменяемой геометрией лопасти на основе нечеткого контроллера // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 159–173.

Манусов Вадим Зиновьевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – применение интеллектуальных информационных технологии и методов искусственного интеллекта для анализа, планирования и оптимизации электроэнергетических систем. Имеет более 200 публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: manusov36@mail.ru

Хасанзода Насрулло, аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – исследование режимов интеллектуальных сетей с возобновляемыми источниками энергии и управления ими на основе методов искусственного интеллекта. Имеет 12 публикаций. E-mail: nasrullo-5445@mail.ru

Бобоев Шараф Асрорович, аспирант кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – статистические методы анализа данных. Имеет 8 публикаций. E-mail: shboboev@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-175-190

Research on optimal modes of intelligent networks with a two-way energy flow[*]

V.Z. MANUSOV[a], *N. KHASANZODA*[b], *Sh.A. BOBOEV*[c]

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

[a] *manusov36@mail.ru* [b] *nasrullo-5445@mail.ru* [c] *shboboev@mail.ru*

Abstract

The need to optimize intelligent system modes in the Smart Grid concept with the function of a two-way energy flow from its distributed generation sources is proved. In this regard, the concept of a generating consumer is introduced for active consumers, which provides a possibility to flexibly regulate energy flows and equalize the load schedule as well as to minimize financial costs of consumed energy. A new notion - the so-called holonic approach – is introduced and justified within the SmartGrid concept as well as a new term “generating consumer-holon” (GC-holon) implying the capability of energy consumers to independently generate electricity by means of renewable energy sources, to accumulate it and exchange the power with other similar GC-holons and with the main generating system. To construct an intelligent network, a holonic structure based on a set of holons (subsystems) is used. The holonic structure assumes subsystems of different nature located at different levels of aggregation and inter-

[*] *Received 06 March 2018.*

connected in order to form a hierarchy of self-regulating holons, called Holarchy. According to A. Koestler, holons are simultaneously, both whole and partial. They are basically autonomous, which allows them to ensure their existence independently. A two-way energy flow for the holonic structure assumes a possibility of energy generation and storage due to an internal structure of the electric consumer. The key point in the work is the use of consumers' own wind resources, which are quite large in the coastal zone of the Far East and on the islands. A new mathematical model of optimal power consumption by the generating consumer in the form of a system of nonlinear algebraic equations (SNAU) with a two-way flow of energy is developed. A system for prioritizing the choice of generation sources is developed, which ensures the minimization of the material and financial costs of the electrical consumer.

Keywords: intellectual network, Smart Grid concept, two-way energy flow, generating consumer holon, holarchy, renewable energy sources, wind power station, energy storage, optimization model

REFERENCES

1. Tuballa M.L., Abundo M.L. A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 3, pp. 710–725.

2. Negeri E., Baken N. Smart integration of electric vehicles in an energy community. *Proceedings of the 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems*, Porto, Portugal, 2012, pp. 25–32.

3. Amin S.M., Wollenberg B.F. Toward a Smart Gri. *IEEE P&E Magazine*, 2005, vol. 3, no. 5, pp. 34–41.

4. Brown R.E. Impact of Smart Grid on distribution system design. *Proceedings of IEEE "Power and Energy Society General Meeting"*, Pittsburgh, 2008, pp. 1–4.

5. European Smart Grids technology platform: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. European Commission Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. European Union, 2006. Available at: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf (accessed 17.09.2018).

6. Manusov V.Z., Khasanzoda N. Kholonicheskii podkhod dlya intellektual'nykh setei v kontseptsii Smart Grid pri dvustoronnem potoke energii [A holonic approach for intelligent networks in the concept of Smart Grid with a two-way flow of energy]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2018, no. 3–4, pp. 206–211. (In Russian).

7. Koestler A. *The ghost in the machine*. London, Penguin, 1990. 400 p. ISBN 0-14-019192-5.

8. Giret A., Botti V. Holons and agents. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2004, vol. 15, no. 5, pp. 645–659.

9. Manusov V.Z., Khasanzoda N. The construction of holonic infrastructure of intelligent networks in the Smart Grid concept with a two-way flow of energy. *Problems of the Regional Energetics*, 2017, vol. 3, no. 35, pp. 76–85.

10. Zhang G., Li W. Flexible holonic organization modeling and cultural evolution. *IEEE 4th International Conference on Wireless Communications. Networking and Mobile Computing*, Dalian, 2008, pp. 202–212.

11. Hatziargyriou N., Jenkins N., Strbac G., Lopes J.A.P., Ruela J., Engler A. MICROGRIDS – large scale integration of micro-generation to low voltage grids. *CIGRE 2006*, 2006, C6-309, pp. 21–28.

12. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Ahyoev J.S. Sozdanie integrirovannoi sistemy elektrosnabzheniya 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. (In Russian).

13. Grogg K. *Harvesting the wind: the physics of wind turbines*. Carleton College, USA, Northfield, 2005. 42 p.

14. Udalov S.N., Manusov V.Z. *Modelirovanie vetroenergeticheskikh ustanovok i upravlenie imi na osnove nechetkoi logiki* [Modeling of wind-driven power plant and their control based on fuzzy logic]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 200 p.

15. Udalov S.N., Manusov V.Z., Zubova N.V. Upravlenie vetroenergeticheskoi ustanovkoi s izmenyaemoi geometriei lopasti na osnove nechetkogo kontrollera [Control of a wind turbine with variable length blades through fuzzy logic controller]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (38), pp. 159–173.

Для цитирования:

Манусов В.З., Хасанзода Н., Бобоев Ш.А. Исследование оптимальных режимов интеллектуальных сетей с двухсторонним потоком энергии // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 175–190. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-175-190.

For citation:

Manusov V.Z., Khasanzoda N., Boboev Sh.A. Issledovanie optimal'nykh rezhimov intellektual'nykh setei s dvukhstoronnim potokom energii [Research on optimal modes of intelligent networks with a two-way energy flow]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 175–190. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-175-190.

ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 72, № 3, 2018, с. 191–202

http://journals.nstu.ru/vestnik
Science Bulletin of the NSTU
Vol. 72, No. 3, 2018, pp. 191–202

ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

УДК 621.31 DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-191-202

Энергетические процессы в простейшей электрической цепи*

А.Г. МАШКИН[a], С.Ю. МАШКИНА[b]

672027, РФ, Забайкальский край, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 39, Забайкальский государственный университет

[a] *a78.vmashkin@arbitr.ru* [b] *mashkinasu@gmail.com*

В работе представлен анализ электроэнергетических процессов на примере простейшей электрической цепи, состоящей из резистора, индуктивности и источника электрической энергии с синусоидальной ЭДС, проведенный на основе рассмотрения движения электрической энергии в элементах цепи, которое осуществлялось на основе сопоставления величин и знаков мгновенной мощности в узловых точках цепи. Для простоты анализа цепь построена таким образом, чтобы движение электрической энергии в ней происходило по одному проводу. Проведенное компьютерное моделирование электрических процессов в исходной цепи дало возможность получить графики мгновенных мощностей, токов и потенциалов в характерных точках цепи, а их сопоставление позволило выявить встречное движение электрической энергии в элементах цепи. В итоге установлено, что все мощности, развиваемые на элементах цепи, состоят из двух компонент, одна из которых определяется движением электрической энергии от источника, а вторая – движением электрической энергии из цепи к источнику. Для достоверности анализа электроэнергетических процессов в цепи, учитывающего движение электрической энергии в ней, было проведено разделение на эти два компонента полных, активных и реактивных мощностей. Такое двухкомпонентное разделение мощностей определяется токами и напряжениями, полученными в результате взаимно ортогонального разложения векторов токов и напряжений, питающих цепь. Составлена схема замещения цепи и найдены ее параметры для первого полупериода питающего тока и напряжения, установлена ее неэквивалентность для второго полупериода. Выяснена неэквивалентность электроэнергетических процессов в цепи для первого и второго полупериодов питающего тока и напряжения, которая определяется движением электрической энергии.

Ключевые слова: мгновенная мощность, движение электрической энергии, встречное движение электрической энергии, прямоугольная трапеция полных мощностей, полная мощность, активная мощность, реактивная мощность, электроэнергетические процессы, мгновенный потенциал и мгновенный ток

ВВЕДЕНИЕ

В электрических цепях синусоидального тока все электроэнергетические процессы проходят в определенной последовательности в течение периода питающего тока и напряжения. Принято осуществлять анализ электроэнерге-

* *Статья получена 28 февраля 2018 г.*

тических процессов в цепях по мгновенной мощности и значениям мощностей, определяемых через ее величину (активная, полная и реактивная мощности). Сам анализ осуществляется за первую половину периода питающего тока и напряжения, и считается, что электроэнергетические процессы в течение второго полупериода тождественны электроэнергетическим процессам в первом. Такая интерпретация, очевидно, обусловлена периодическим характером изменения мгновенной мощности с двойной частотой по сравнению с частотой питающего тока и напряжения.

Поэтому первый период мгновенной мощности описывает электроэнергетические процессы в цепи за первую половину периода питающего тока и напряжения, а он тождественен второму периоду мгновенной мощности. Это дает право утверждать, что энергетические процессы в течение второго полупериода тождественны электроэнергетическим процессам в первом. Хотя простое сопоставление тока и напряжения в первом полупериоде с током и напряжением во втором полупериоде говорит о принципиальной неэквивалентности электроэнергетических процессов в цепи в этих полупериодах. Для того чтобы уйти от этого противоречия, в работе использован анализ движения электрической энергии в элементах цепи на основе величин и знаков мгновенной мощности в узловых точках цепи, который стал основой при рассмотрении электроэнергетических процессов в цепи. Анализ движения электрической энергии в простейшей цепи был осуществлен на основе компьютерного моделирования цепи, а последующее рассмотрение движения электрической энергии за первый и второй полупериоды питающего тока и напряжения стало основой описания электроэнергетических процессов в ней.

1. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

При анализе линейных цепей синусоидального тока возникают задачи, связанные с процессами встречного движения электрической энергии в элементах цепи [1–5]. Для анализа встречного движения электрической энергии рассмотрим простейшую электрическую цепь на рис. 1, состоящую из сопротивления R, индуктивности L и источника электрической энергии с мгновенным напряжением на зажимах u_e, величина которого определяется разностью мгновенных потенциалов φ_e, φ_0 в точках 1, 0. По элементам цепи протекает ток i.

Направление движения электрической энергии и ее величину в любой точке электрической цепи можно определить величиной и знаком мгновенной мощности p в этой точке, если она определяется с учетом потенциала для данной точки [6–8]. Так, при принятых знаках мгновенного тока и мгновенных потенциалов в электрической цепи (рис. 1) при $p > 0$ энергия движется от источника через точку, в которой непрерывно определяется потенциал; при $p < 0$ энергия движется к источнику, при $p = 0$ движение электрической энергии в данной точке отсутствует. В анализируемой цепи движение электрической энергии определялось в точках 1 и 2, так как через заземленную точку 0 движение электрической энергии отсутствует, потому что потенциал этой точки всегда равен нулю, и поэтому мгновенная мощность $p = 0$.

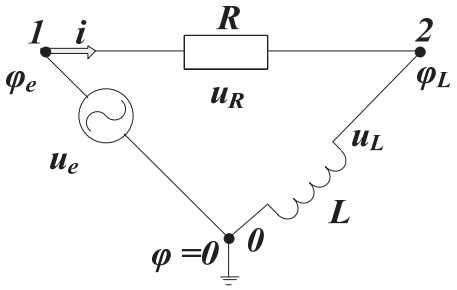


Рис. 1. Простейшая цепь ***R-L***

Fig. 1. The simplest ***R-L*** circuit

При моделировании в цепи определяли ток *i*, который протекает по элементам цепи: источнику электрической энергии u_e, сопротивлению *R* и индуктивности *L*, а также мгновенные потенциалы и мгновенные мощности в точках 1 и 2 [9, 10]. В этих точках имеет место встречное распространение электрической энергии в сопротивление *R*, которое можно определить по временным диаграммам результатов моделирования, приведенных на рис. 2.

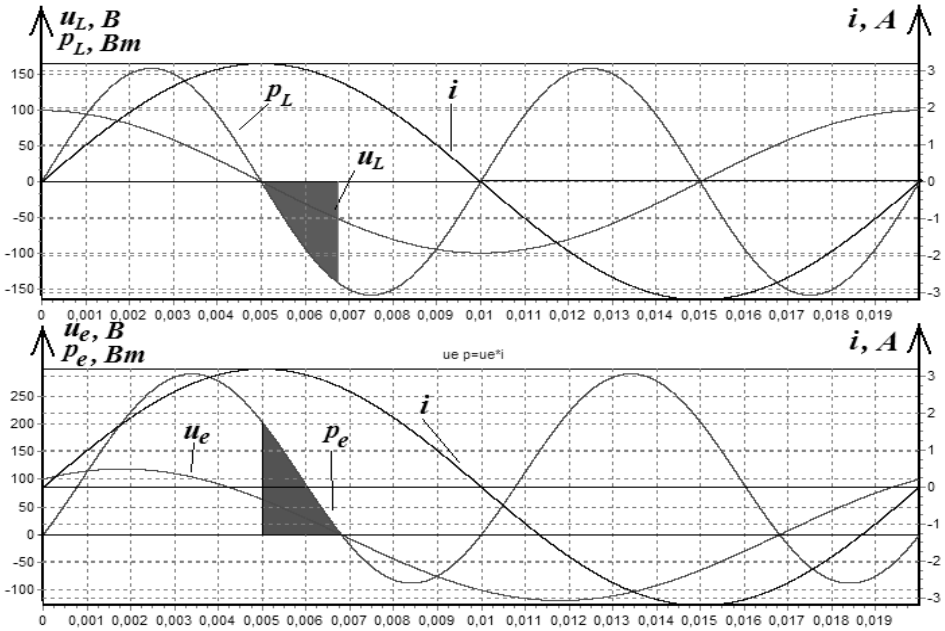


Рис. 2. Представление встречного распространения электрической энергии в сопротивление *R*

Fig. 2. Representation of counter propagation of electric energy in the *R* resistance

Моделирование было реализовано в интегрированной среде разработки программного обеспечения Delphi [11] для семейства операционных систем Microsoft Windows на объектно ориентированном языке программирования Object Pascal [12].

В таблице приведены входные параметры моделирования.

Входные параметры моделирования

Input parameters of modeling

Наименование величины, единица измерения	Значение величины
Сопротивление R, Ом	10
Напряжение источника u_e, В	100
Индуктивность L, Гн	0,1
Несущая частота f, Гц	50

Графики тока и напряжения были представлены в виде гармонического сигнала.

На рис. 2 площадь заштрихованных областей определяется величинами электрической энергии, поступающей встречно в сопротивление R. На верхнем графике электрическая энергия поступает от индуктивности L, на нижнем графике – от источника энергии. Временной интервал встречного движения энергии в сопротивление R начинается с момента перехода через 0 мгновенной мощности на индуктивности (верхний график) до момента достижения 0 мгновенной мощностью от источника энергии (нижний график).

2. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Встречное распространение электрической энергии в теории цепей не рассматривается, что ведет к неопределенности при решении ряда задач. Например, нельзя разделить мощности в цепи на мощности, которые возникают при движении энергии от источника энергии, и мощности при ее обратном движении. Всё это относится как к полным S, так и к реактивным Q и активным P мощностям.

Чтобы решить эту задачу, надо найти мощности в цепи при движении энергии от источника и мощности в цепи при ее обратном движении к источнику. Нахождение этих мощностей будем искать с помощью компонент токов и напряжений, полученных на основе взаимно ортогональных разложений аналитических представлений напряжения и тока [13, 14]. Такое разложение позволяет представить электрический процесс в анализируемой цепи как результат наложение двух процессов – процесса «действия» (генераторного) и процесса «отклика» (реактивного). На рис. 3 для наглядности представлено взаимно ортогональное разложение тока и напряжения в векторной форме на комплексной плоскости.

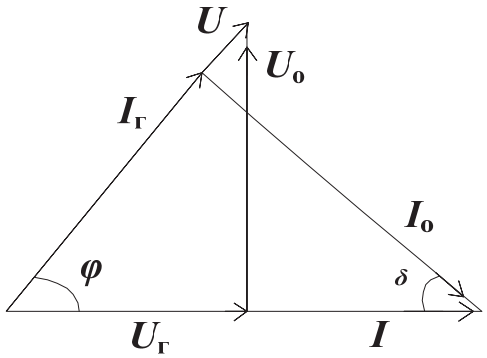


Рис. 3. Ортогональное разложение токов
и напряжений в векторной форме

Fig. 3. Orthogonal expansion of currents
and voltages in a vector form

Представление ортогонального разложения тока и напряжения в тригонометрической форме:

$$i = I_m \sin(\omega t), \quad u = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

$$u_г = U_m \cos(\varphi)\sin(\omega t), \quad u_о = U_m \sin(\varphi)\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \tag{1}$$

$$i_г = I_m \cos(\varphi)\sin(\omega t + \varphi), \quad i_о = I_m \sin(\varphi)\sin\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right),$$

или в комплексной форме

$$\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{i0}, \quad \dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{i\varphi},$$

$$\dot{I}_г = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos\varphi e^{i\phi}, \quad \dot{U}_г = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cos\varphi e^{i0}, \tag{2}$$

$$\dot{I}_о = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sin\varphi e^{i\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)}, \quad \dot{U}_о = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sin\varphi e^{i\frac{\pi}{2}},$$

где U_m, I_m – амплитудные значения напряжения и тока; φ – разность фаз.

На рис. 4 приведены графики изменения мгновенных токов и напряжений (1). Для выражения (1) можно составить систему мгновенных мощностей: $p = ui$, $p_{гг} = u_г i_г$, $p_{оо} = u_о i_о$, $p_{ог} = u_о i_г$, $p_{го} = u_г i_о$. Все эти мгновенные мощности изменяются с удвоенной частотой напряжения цепи.

На рис. 5 приведены графики изменения мгновенных мощностей p, $p_{гг}$, $p_{оо}$, $p_{ог}$, $p_{го}$.

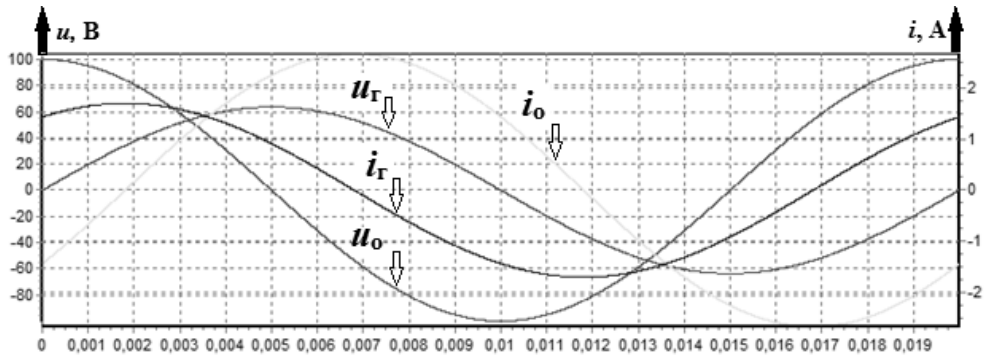


Рис. 4. Графики мгновенных значений токов и напряжений при ортогональном разложении

Fig. 4. Graphs of instantaneous values of currents and voltages in orthogonal expansion

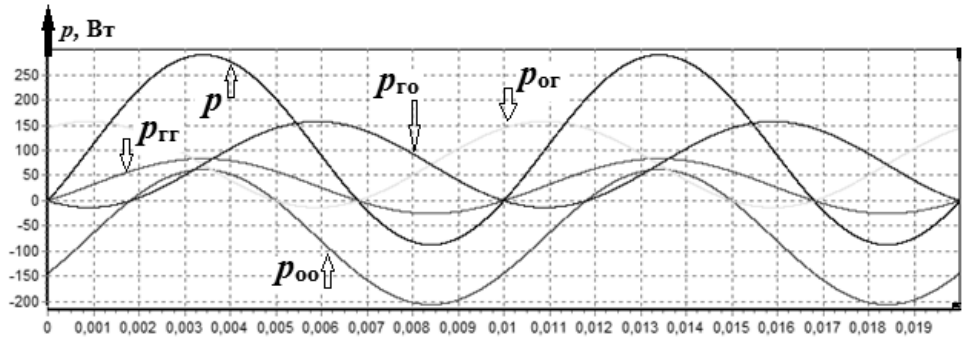


Рис. 5. Графики изменения мгновенных мощностей

Fig. 5. Graphs of instantaneous power changes

Очевидно, что для ортогонального разложения комплексных векторов токов и напряжений (2) можно составить систему полных комплексных мощностей:

$$\tilde{S}_{\text{гг}} = \dot{U}_{\text{г}} \overset{*}{I}_{\text{г}} = U_{\text{г}} I_{\text{г}} e^{-j\varphi}, \quad \tilde{S}_{\text{ог}} = \dot{U}_{\text{о}} \overset{*}{I}_{\text{г}} = U_{\text{о}} I_{\text{г}} e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)},$$

$$\tilde{S}_{\text{го}} = \dot{U}_{\text{г}} \overset{*}{I}_{\text{о}} = U_{\text{г}} I_{\text{о}} e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)}, \quad \tilde{S}_{\text{оо}} = \dot{U}_{\text{о}} \overset{*}{I}_{\text{о}} = U_{\text{о}} I_{\text{о}} e^{j(\pi-\varphi)}, \tag{3}$$

Сумма этих полных мощностей будет равна результирующей полной мощности S и результирующим активной P и реактивной Q мощностям электрической цепи, так как

$$\tilde{S} = \dot{U} \overset{*}{I} = (\dot{U}_{\text{г}} + \dot{U}_{\text{о}})(\overset{*}{I}_{\text{г}} + \overset{*}{I}_{\text{о}}) = P + jQ. \tag{4}$$

На рис. 6 представлен четырехугольник (прямоугольная трапеция) полных мощностей цепи (3).

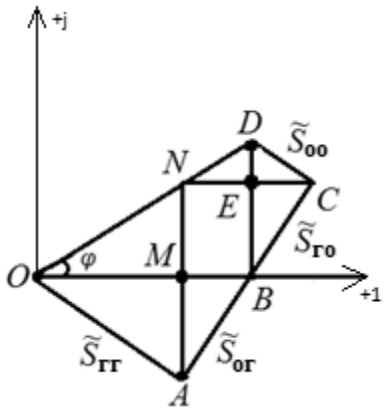


Рис. 6. Прямоугольная трапеция полных мощностей простейшей цепи

Fig. 6. a rectangular trapezoid of full powers of the simplest circuit

Прямоугольная трапеция полных мощностей *OACD* (рис. 6) надстроена над треугольником мощностей *OBD*. Этот треугольник и трапеция построены на комплексной плоскости в осях активной мощности: ось *O*+1 – действительная ось, продолжение отрезка *OB* (активная мощность цепи) и мнимая ось *O*+j – параллельная отрезку *BD* (реактивная мощность цепи). Значения величин полных мощностей, составляющих данную трапецию, позволяет выявить характер и последовательность электрических процессов в цепи и установить между ними причинно-следственные связи. Этот подход основывается на локализации мест приложения всех четырех полных мощностей согласно задаваемой цепи, а затем на сопоставлении и анализе знаков и величин активных и реактивных компонент этих полных мощностей (3) с учетом направления распространения электрической энергии.

Из трапеции полных мощностей при анализе схемы (см. рис. 1) следует, что пара полных мощностей $\tilde{S}_{гг}$, $\tilde{S}_{го}$ развивается на активном сопротивлении *R*, так как к нему приложено напряжение $U_о$. Вторая пара полных мощностей $\tilde{S}_{оо}$, $\tilde{S}_{ог}$ развивается на индуктивности *L*, потому что к ней приложено напряжение $U_о$. Активные компоненты первой пары полных мощностей $\tilde{S}_{гг}$, $\tilde{S}_{го}$ и второй пары $\tilde{S}_{оо}$, $\tilde{S}_{ог}$ имеют разную электрофизическую природу. На рис. 6 это отрезки *OM*, *MB* на оси активной мощности для первой пары и один и тот же отрезок *EC*, параллельный оси активной мощности для второй пары. Активные мощности первой пары полных мощностей определяют джоулевы потери в сопротивлении *R* при поступательном движении носителей электрических зарядов от источника энергии – мощность $P_{гг}$ и при их обратном поступательном движении от индуктивности *L* к источнику электрической энергии – мощность $P_{го}$ (отрезки *OM* и *MB*). Компоненты полных мощностей второй пары, параллельные оси активных мощностей (отрезок *EC*), т. е. средние мощности $P_{ог}$ и $P_{оо}$, определяются кинетическими энергиями разнонаправленного вращательного движения носителей электрического

заряда за единицу времени. Это связано с тем, что в катушке индуктивности L происходит энергообменный процесс, при котором электрическая энергия, движущаяся от источника энергии $P_{\text{ог}}$, преобразуется в электрическую энергию, движущуюся обратно к источнику $P_{\text{оо}}$ [15]. Это преобразование обусловливается тем, что переменный ток с действующим значением $I_{\text{г}}$ создает в витках катушки ЭДС самоиндукции, которая, в свою очередь, вызывает протекание в катушке индуктивности переменного тока с действующим значением $I_{\text{о}}$. Тем самым в катушке индуктивности происходит разворот движения электрической энергии от источника энергии обратно к источнику.

Очевидно, все три компоненты, параллельные оси активных мощностей, самосогласованы друг с другом, так как равны между собой: $P_{\text{ог}} = P_{\text{оо}} = P_{\text{го}}$. Это имеет ясный электротехнический смысл, который поясняется следующим образом: поступающая в катушку индуктивности L электрическая энергия связана с кинетической энергией вращения носителей электрического заряда в витках катушки, равняется средней мощности $P_{\text{го}}$ и полностью за счет ЭДС самоиндукции преобразуется в кинетическую энергию вращательного движения носителей заряда $P_{\text{оо}}$. Это определяет обратное (к источнику энергии) движение электрической энергии, которая сбрасывается во внешнюю цепь и затем расходуется уже при поступательном движении носителей заряда от L к источнику.

Для анализируемой схемы полные мощности $\tilde{S}_{\text{гг}}$, $\tilde{S}_{\text{го}}$ определяются движением электрической энергии от источника электрической энергии u_e в цепь и развиваются соответственно на сопротивлении R и индуктивности L (ортогональные отрезки OA и BC). Мощности $\tilde{S}_{\text{оо}}$, $\tilde{S}_{\text{ог}}$ определяются движением к источнику электрической энергии u_e в индуктивности L и в сопротивлении R (ортогональные отрезки CD и BA):

$$R_{\text{г}} = \frac{P_{\text{гг}}}{I_{\text{г}}^2} = \frac{U_{\text{г}}^2}{P_{\text{гг}}}, \quad R_{\text{о}} = \frac{P_{\text{ог}}}{I_{\text{о}}^2} = \frac{U_{\text{г}}^2}{P_{\text{ог}}}; \tag{5}$$

$$L_{\text{г}} = \frac{Q_{\text{го}}}{\omega I_{\text{г}}^2} = \frac{U_{\text{о}}^2}{\omega Q_{\text{го}}}, \quad L_{\text{о}} = \frac{Q_{\text{оо}}}{\omega I_{\text{о}}^2} = \frac{U_{\text{о}}^2}{\omega Q_{\text{оо}}}. \tag{6}$$

Всё представленное выше: описание электрических процессов, их интерпретация прямоугольной трапецией полных электрических мощностей, а также схемой замещения и направлениями протекания токов и напряжений (рис. 7) применительно только к временному интервалу от 0 с до 0,01 с (см. рис. 4 и 5) – соответствует первому полупериоду тока и напряжения источника и соответственно первому периоду мгновенной мощности и всем последующим ее нечетным периодам.

На основе изложенного находим параметры для более развернутой схемы замещения, показанной на рис. 7.

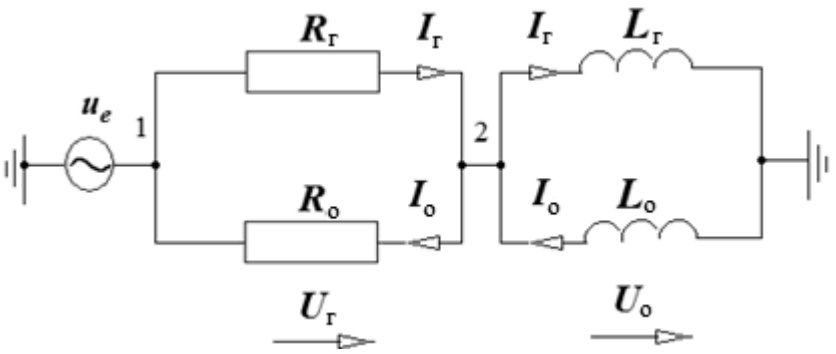


Рис. 7. Схема замещения, соответствующая прямоугольной трапеции полных мощностей простейшей цепи для первого полупериода

Fig. 7. An equivalent circuit corresponding to a rectangular trapezoid of full powers of the simplest circuit for the first half-period

Для временного интервала от 0,01с до 0,02 с электрические процессы и их интерпретация прямоугольной трапецией полных мощностей, а также направления токов и напряжений схемы замещения рис. 7 будут иными из-за изменения направления основных потоков электрической энергии. Это связано с тем, что через точку 0 электрическая энергия не может поступать в цепь. В этом случае полные мощности $\tilde{S}_{гг}$, $\tilde{S}_{го}$ будут определяться движением электрической энергии к источнику электрической энергии из цепи, это следует также и из того, что напряжение $u_г < 0$ с момента 0,01 с до 0,02 с (см. рис. 4), а мощности $\tilde{S}_{оо}$, $\tilde{S}_{ог}$ будут обусловлены движением электрической энергии в цепи от источника (см. рис. 4 и 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное описание энергетических процессов в простейших электрических цепях позволяет все мощности цепи представлять состоящими из двух компонент. Эти компоненты определяются разнонаправленными движениями электрической энергии. Так, полная мощность равна $S = S_{гг} + S_{оо}$; активная мощность $P = P_{гг} + P_{ог}$; реактивная мощность $Q = Q_{оо} + Q_{го}$, где $S_{гг}$, $P_{гг}$, $Q_{го}$ – полная, активная и реактивная мощности, обусловленные движением электрической энергии от источника энергии в цепь для нечетных периодов мгновенной мощности и движением электрической энергии к источнику энергии из цепи – для четных периодов мгновенной мощности; $S_{оо}$, $P_{ог}$, $Q_{оо}$ – полная, активная и реактивная мощности, обусловленные движением электрической энергии к источнику энергии из цепи для нечетных периодов мгновенной мощности и движением электрической энергии от источника энергии в цепь – для четных периодов мгновенной мощности.

Полное и достоверное описание энергетических процессов в цепи возможно только на основе анализа всей совокупности электрических явлений, связанных с движением электрической энергии, которые возникают в цепи в течение двух последовательных периодов мгновенной мощности. Эти два

последовательных периода мгновенной мощности описывают принципиально разные электроэнергетические процессы в цепи, которые определяются движением электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям – диакоптика. – М.: Советское радио, 1972. – 453 с.

2. *Крон Г.* Тензорный анализ сетей. – М.: Советское радио, 1978. – 720 с.

3. *Соколов В.С.* Проблемы мониторинга качества электроэнергии // Промышленная энергетика. – 2004. – № 1. – С. 25–29.

4. *Соколов В.С.* Контроль, мониторинг и управление качеством электрической энергии // Электро. – 2003. – № 5. – С. 3–8.

5. *Машкин А.Г.* Отклик в простейших линейных системах // Научное обозрение. – 2006. – № 1. – С. 53–57.

6. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными / под общ. ред. К.М. Поливанова. – М.: Энергия, 1972. – 240 с.

7. Мощность переменного тока / А. Крогерис, К. Рашевиц, Э. Трейманис, Я. Шинка. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.

8. *Малыгин В.М.* Вектор плотности потока энергии в R- и RL – электрических цепях постоянного и переменного тока // Электрика. – 2006. – № 9. – С. 26–30.

9. *Машкин А.Г.* Совершенствование методов анализа и средств повышения качества электрической энергии и эффективности электропотребления в точках общего присоединения тяговых подстанций: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.14.02. – Красноярск, 2012. – 40 с.

10. *Машкин А.Г., Машкин В.А.* Расчет электрических цепей методом кватернионов // Научное обозрение. – 2008. – № 3. – С. 43–50.

11. *Бакнелл Л.* Фундаментальные алгоритмы и структуры данных в Delphi. – СПб.: Питер, 2006. – 560 с. – (Библиотека программиста). – ISBN 5-93772-087-3.

12. *Тейксейра П., Пачеко С.* Borland Delphi 6: руководство разработчика. – М.: Вильямс, 2002. – 1120 с. – ISBN 5-8459-0305-X.

13. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 463 с. – ISBN 5-94723-620-6.

14. *Петров А.Е.* Тензорный метод двойственных сетей. – М.: Центр информационных технологий в природопользовании, 2007. – 496 с. – ISBN 5-9751-0036-4.

15. *Машкин А.Г.* Реактивная мощность в простейших линейных системах // Электрика. – 2015. – № 4. – С. 23–26.

Машкин Анатолий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры ИВТиПМ Забайкальского государственного университета. Основное направление научных исследований – повышение качества электрической энергии в системах общего и тягового электроснабжения. Имеет более 70 научных трудов, в том числе авторские свидетельства, патенты, а также две монографии. E-mail: a78.vmashkin@arbitr.ru

Машкина Светлана Юрьевна, старший преподаватель кафедры ИВТиПМ Забайкальского государственного университета, инженер-программист. Основное направление исследований – математическое моделирование. Имеет более 15 научных трудов, в том числе патенты и свидетельства на программы ЭВМ. E-mail: mashkinasu@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-191-202

Energy processes in the simplest electrical circuit[*]

A.G. Mashkin [a], ***S.Yu. Mashkina*** [b]

Zabaykalsky State University, 39, Aleksandro-Zavodskaya st, Chita, Zabaykalsky krai, 672027

[a] *a78.vmashkin@arbitr.ru* [b] *mashkinasu@gmail.com*

Abstract

The paper presents an analysis of electric power processes using an example of a simple electric circuit consisting of a resistor, inductance and a source of electric energy with a sinusoidal EMF based on the electric energy motion in the elements of the circuit, which was performed on the basis of comparison of magnitudes and signs of instantaneous power at the node points of the circuit. For simplicity of analysis, the circuit is constructed in such a way that the motion of electric energy in it occurs along one wire. The computer simulation of electric processes in the initial circuit made it possible to obtain graphs of instantaneous powers, currents, and potentials at the characteristic points of the circuit, and their comparison made it possible to detect the oncoming movement of electric energy in the elements of the circuit. As a result, it is revealed that all the capacities developed on the elements of the chain consist of two components, the first of which is determined by the movement of electric energy from the source, and the second one -by the movement of electric energy from the circuit to the source. To validate the analysis of electric power processes in the circuit, taking into account the movement of electric energy in it, the separation of these two components into full, active, and reactive capacities was carried out. This two-component power separation is determined by the currents and voltages obtained as a result of mutually orthogonal decomposition of the current and voltage vectors supplying the circuit. A circuit for replacing the circuit is constructed and its parameters for the first half-cycle of the supply current and voltage are found, and its nonequivalence is revealed for the second half-period. The nonequivalence of electric power processes in the circuit for the first and second half-periods of the supply current and voltage is determined, which is determined by the movement of electril energy.

Keywords: instantaneous power, electric energy, counter-motion of electric energy, rectangular trapezoid of full powers, total power, active power, reactive power, electric power processes, instantaneous potential and instantaneous current

REFERENCES

1. Kron G. *Issledovanie slozhnykh sistem po chastyam – diakoptika* [Investigation of complex systems in parts – diakoptika]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. 453 p.

2. Kron G. *Tensor analysis of networks*. New York, London, Macdonald, 1965 (Russ. ed.: Kron G. *Tenzornyi analiz setei*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978. 720 p.).

3. Sokolov V.S. Problemy monitoringa kachestva elektroenergii [Problems of monitoring the quality of electricity]. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 2004, no. 1, pp. 25–29.

4. Sokolov V.S. Kontrol', monitoring i upravlenie kachestvom elektricheskoi energii [Monitoring, monitoring and management of electrical energy quality]. *Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' – Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2003, no. 5, pp. 3–8.

5. Mashkin A.G. Otklik v prosteishikh lineinykh sistemakh [Response in the simplest linear systems]. *Nauchnoe obozrenie – Science Review*, 2006, no. 1, pp. 53–57.

[*] *Received 28 February 2018.*

6. Polivanov K.M., ed. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*. V 3 t. T. 1. *Lineinye elektricheskie tsepi s sosredotochennymi postoyannymi* [Theoretical foundations of electrical engineering. In 3 vol. Vol. 1.]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 240 p.

7. Krogeris A., Rashevits K., Treymanis E, Shinka Ya. *Moshchnost' peremennogo toka* [Power alternating current]. Riga, Institute of Physical Energetics Publ., 1993. 294 p. (In Russian).

8. Malygin V.M. Vektor plotnosti potoka energii v R- i RL – elektricheskikh tsepyakh postoyannogo i peremennogo toka [The vector of energy flux density in R- and RL-electric circuits of direct and alternating current]. *Elektrika – Electrics*, 2006, no. 9, pp. 26–30.

9. Mashkin A.G. *Sovershenstvovanie metodov analiza i sredstv povysheniya kachestva elektricheskoi energii i effektivnosti elektropotrebleniya v tochkakh obshchego prisoedineniya tyagovykh podstantsii*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Improvement of methods of analysis and means to improve the quality of electrical energy and the efficiency of power consumption at the points of general connection of traction substations. Author's abstract of Dr. eng. sci. diss.]. Krasnoyarsk, 2012. 40 p.

10. Mashkin A.G., Mashkin V.A. Raschet elektricheskikh tsepei metodom kvaternionov [Calculation of electric circuits by the quaternion method *Nauchnoe obozrenie – Science Review*, 2008, no. 3, pp. 43–50.

11. Bucknall J. *The Tomes of Delphi : algorithms and data structures*. Plano, Tex., Wordware Publishing, 2001. 525 p. (Russ. ed.: Baknell L. *Fundamental'nye algoritmy i struktury dannykh v Delphi*. St. Petersburg, Piter Publ., 2006. 560 p.).

12. Teixeira S., Pacheco X. Borland Delphi 6 developer's guide. Indianapolis, Ind., SAMS, 2002. 1169 p. (Russ. ed.: Teikseira P., Pacheko S. *Borland Delphi 6: rukovodstvo razrabotchika*. Moscow, Vil'yams Publ., 2002. 1120 p.).

13. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*. V 3 t. T. 1 [Theoretical foundations of electrical engineering. In 3 vol. Vol. 1]. 4th ed. St. Petersburg, Piter Publ., 2004. 463 p. ISBN 5-94723-620-6.

14. Petrov A.E. *Tenzornyi metod dvoistvennykh setei* [Tensor method of dual networks]. Moscow, Tsentr informatsionnykh tekhnologii v prirodopol'zovanii Publ., 2007. 496 p.

15. Mashkin A.G. Reaktivnaya moshchnost' v prosteishikh lineinykh sistemakh [Reactive power in the simplest linear systems]. *Elektrika – Electrics*, 2015, no. 4, pp. 23–26.

Для цитирования:

Машкин А.Г., Машкина С.Ю. Энергетические процессы в простейшей электрической цепи // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 191–202. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-191-202.

For citation:

Mashkin A., Mashkina S. Energeticheskie protsessy v prosteishei elektricheskoi tsepi [Energy processes in the simplest electrical circuit]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 191–202. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-191-202.

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, телевещания 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 **– А4**. 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, с межстрочным интервалом 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**) – 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 на английском языке**. Подрисуночные надписи 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 – курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0C. 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):

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha .$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул помещать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \qquad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (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 пропускается 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 с 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 языке.**

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://vestnik.infoterra.ru/index.php