
НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 2 (75)

2019

УДК 681.51(06)
Н 76

Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Члены редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Хи Жаохуи, Харбинский университет науки и технологии, Китай

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

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

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

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

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

E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru

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

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ»)

УДК 681.51(06)

© Коллектив авторов, 2019

© Новосибирский государственный
технический университет, 2019

**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 1814-1196

№ 2 (75)

2019

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Дмитриев А.К., Бакланов А.Е., Саюн В.И., Бакланова О.Е., Григорьева С.В., Алимханова А.Ж. Система обеспечения равномерного освещения с использованием веб-камеры.....	7
Калязина Д.М., Кашевник А.М. Разработка и оценка онтологии социокиберфизической системы на основе анализа типовых сценариев использования мобильных роботов.....	21
Малявко А.А. Обработка ошибок в синтаксическом анализаторе компилятора языка E1.....	37
Петров М.В. Формирование группы исполнителей для совместного решения задач: основанный на компетенциях метод и реализация.....	49
Попов Г.А., Попова Е.А., Васильева О.В. Анализ входных условий в модели информационной безопасности, построенной на основе аппарата редких событий.....	69
Фетисов Д.В., Колесенков А.Н., Бабаев С.И., Фетисова Т.А. Разработка модели субпиксельной обработки аэрокосмических снимков при дистанционном зондировании Земли.....	89
Цветков В.Я. Комплементарные отношения.....	101

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Сырнаева А.С., Михайлова Д.С. Экспериментальные исследования оптических резонансных систем Фабри–Перо с зеркалами полного внутреннего отражения.....	115
---	-----

ЭНЕРГЕТИКА

Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Бурьков Д.В. Учет энергии частичных разрядов в математической модели термофлуктуационных процессов силового кабеля.....	127
Красильникова Т.Г., Самородов Г.И. Угловая характеристика синхронного генератора, работающего через длинную линию, в паузу ОАПВ.....	141
Правила для авторов	154

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

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

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № 77–1599 от 10 февраля 2000 г.
Периодичность издания – 4 номера в год.
Журнал реферирован в ВИНТИ (<http://www.2.viniti.ru>)
Лицензия ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 18.06.2019. Выход в свет 20.06.2019.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 13,65. Печатных листов 9,75. Издательский № 136. Заказ № 1063.
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

№ 2 (75)

2019

УДК 681.51(06)
H 76

Journal was established by
Novosibirsk State Technical University

Editorial board

Chief editor

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

Deputy chief editor

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

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

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

Executive Secretary

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

The members of the editorial Board

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

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

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

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

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

Irkutsk, RF

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

Novosibirsk, RF

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

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

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

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

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

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

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

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

E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru

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

УДК 681.51(06)

© Authors, 2019

© Novosibirsk State Technical University, 2019

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

ISSN 1814-1196

№ 2 (75)

2019

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Dmitriev A.K., Baklanov A.E., Sayun V.I., Baklanova O.E., Grigorieva S.V., Alimkhanova A.Zh. A uniform lighting system using a webcam	7
Kalyazina D.M., Kashevnik A.M. Development and evaluation of cyber-physical-social system ontology based on the analysis of typical scenarios for mobile robots interaction	21
Malyavko A.A. Errors handling in the parser for the El-language compiler.....	37
Petrov M.V. Formation of an expert group for joint problem solving: the competence method and its implementation	49
Popov G.A., Popova E.A., Vasilieva O.V. Analysis of input conditions in the information security model based on the rare event apparatus	69
Fetisov D.V., Kolesenkov A.N., Babaev S.I., Fetisova T.A. Development of a model for sub-pixel processing of aerospace images during remote sensing of the Earth.....	89
Tsvetkov V.Ya. Complementary relationships	101

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

Syrnaeva AA., Mikhailova D.S. Experimental research into optical resonance of Fabry–Perot systems with total internal reflection mirrors.....	115
--	-----

POWER ENGINEERING

Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Bur'kov D.V. Accounting for the partial discharge energy in the mathematical model of power cable thermal fluctuation processes	127
Krasil'nikova T.G., Samorodov G.I. Angular characteristic of a synchronous generator operating over a long line in the dead time of single-phase auto-reclosing	141
Rules for authors	154

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

The journal is registered by Russian Federation Committee on the press.
The certificate on registration of mass media of PI No. 77-1599 of February 10, 2000.
Publication frequency – 4 numbers a year.
Journal referenced in VINITI (<http://www.viniti.ru>)
License ID 04303 from 20.03.2001. Signed in print June 18, 2019.
Date of publication June 20, 2019. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 13,65. Printed pages 9,75.
Publishing number 136. Order number 1063.

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

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.324

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-7-20

Система обеспечения равномерного освещения с использованием веб-камеры^{*}

А.К. ДМИТРИЕВ^{1,a}, А.Е. БАКЛАНОВ^{2,b}, В.М. САЮН^{3,c}, О.Е. БАКЛАНОВА^{2,d},
С.В. ГРИГОРЬЕВА^{2,e}, А.Ж. АЛИМХАНОВА^{2,f}

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

² 070004, РК, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова А.К., 69, Восточно-Казахстанский государственный технический университет

³ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

^a alexander_dmitriev@ngs.ru ^b ABaklanov_62@mail.ru ^c svm@ie.tusur.ru

^d OEBaklanova@mail.ru ^e SGrigorieva@ektu.kz ^f aslima_alimhanova@mail.ru

Настоящая статья посвящена разработке системы управления светодиодными осветительными приборами для обеспечения равномерного бестеневого освещения, которое необходимо как сотрудникам медицинских учреждений, например, при проведении хирургических операций, так и на предприятиях, где используется высокоточное оборудование. Предложенная методика управления освещенностью позволяет обеспечить равномерную освещенность в соответствии с нормативными документами и с учетом естественного освещения. В работе предложена система коррекции освещенности с помощью управления светодиодными лампами офисного помещения. Контроль освещенности в разработанной системе осуществлялся с помощью персонального компьютера. Для этого было разработано программное обеспечение в среде Visual Studio.NET на языке C#. Для проверки предложенной методики была разработана экспериментальная установка с использованием платы Arduino UNO, где в качестве датчика освещенности была использована веб-камера. Коррекция освещенности светодиодной системы освещения осуществлялась при подключении микроконтроллера. В результате была разработана система, которая поддерживает заданный уровень освещенности в заранее выбранных областях рабочей поверхности помещения.

Ключевые слова: светодиодное освещение, осветительная система, веб-камера, система управления освещенностью, датчик освещенности, плата Arduino UNO, микроконтроллер

* Статья получена 14 января 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью обеспечения равномерного бестеневого освещения для работы в медицинских учреждениях, например, при проведении хирургических операций, а также на предприятиях, использующих высокоточное оборудование.

На освещение в мире по статистике расходуется приблизительно 19 % электроэнергии, что подтверждается Международным энергетическим агентством [1].

По данным Глобального экологического фонда, созданного при Организации Объединенных Наций, в Казахстане расход электроэнергии на освещение составляет 13 %. В России этот показатель в среднем 13...15 % [2]. Освещение в общественных и жилых зданиях составляет 40...60 % от общего освещения [3]. Данный показатель для стран СНГ превышает расход электроэнергии на освещение в 2–3 раза по сравнению с европейскими странами [4, 5].

Одним из энергосберегающих направлений являются светодиодные технологии. Повышенный интерес обусловлен рядом преимуществ светодиодов по сравнению с другими источниками света, а также поддерживается правительственными решениями. Однако на сегодняшний день существуют вопросы, связанные с организацией светодиодного освещения.

Важным является обеспечение равномерного освещения на рабочей поверхности. Кроме этого, международные исследования показали, что правильно подобранный уровень освещенности, цветовая температура и индекс цветопередачи входят в понятие «качественный свет» и оказывают существенное влияние на здоровье человека [6, 7]. Производственная работа при освещении плохого качества или низких и высоких уровнях может стать причиной усталости и напряжения глаз, переутомления, трудности сосредоточения на сложной работе, что приводит к снижению производительности труда [8, 9].

В настоящее время существует несколько направлений по обеспечению качественного освещения. Первый подход – оптимизация размещения светодиодных светильников [10, 11], второй подход – управление осветительных приборов [12–15]. При этом классическая схема управления основана на использовании датчиков освещенности, расположенных на рабочей поверхности [16].

Внедрение системы управления светодиодными технологиями позволяет значительно уменьшить расходы электроэнергии на освещение. При осуществлении регулирования освещенности появляется возможность учитывать естественное освещение и тем самым дополнительно снизить потребление энергии в осветительных системах. Обеспечение равномерного освещения позволит улучшить условия работы как сотрудникам офисных предприятий, так и на производстве.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Работы по системе светодиодного освещения связаны с определением оптимального расположения светодиодных светильников, а также с оптимизацией средней освещенности в рабочих помещениях. Ставилась задача со-

здать систему управления светодиодными осветительными приборами, позволяющими обеспечить равномерное освещение на рабочей поверхности в помещении путем изменения мощности осветительных приборов.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ ОСВЕЩЕННОСТИ

В качестве основы для разработки методики коррекции освещенности было выбрано офисное помещение длиной 9 м, шириной 4 м, высотой 2,8 м. На потолке размещены шесть светодиодных осветительных приборов с общей потребляемой мощностью 186 Вт и световым потоком 18 720 лм.

Общая схема системы для проведения эксперимента представлена на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из следующих компонентов: модель офисного помещения с геометрическими параметрами $54 \times 24 \times 47$ см, плата Arduino UNO на базе микроконтроллера ATmega328, веб-камера, персональный компьютер со специальным программным обеспечением.

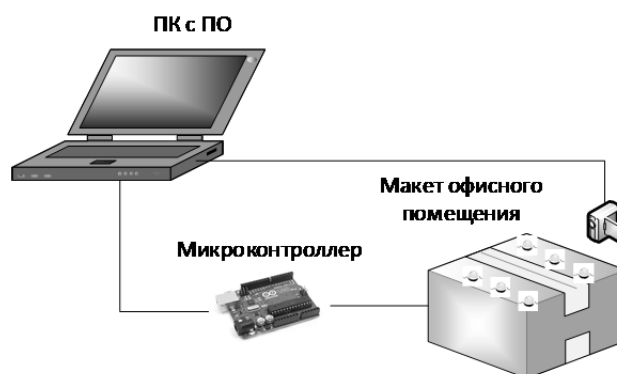


Рис. 1. Схема системы управления освещенностью для эксперимента

Fig. 1. Scheme of the illumination control system for the experiment

Для моделирования были выбраны светодиоды мощностью 1 Вт в количестве 6 штук. Геометрическое расположение светодиодов в макете показано на рис. 2. Относительное расположение светодиодов в макете соответствует расположению светодиодных светильников в офисном помещении. При этом оптимальное размещение светодиодных светильников рассчитывалось в программе DIALuxLight [17]. Решения задачи оптимизации размещения нами были представлены в работах [11, 18].

Принципиальная электрическая схема подключения системы коррекции освещенности представлена на рис. 3. Выходы микроконтроллера Arduino выдают два вида напряжения: 0 и 5 В, т. е. светодиод либо включен, либо выключен. С помощью широтно-импульсной модуляции можно регулировать длительность включенного состояния светодиода и поддерживать определенный уровень освещенности. Микроконтроллер ArduinoUno имеет шесть ШИМ-выходов: 3, 5, 6, 9, 10 и 11. С помощью этих выходов мы можем

управлять светодиодами. На рис. 2 видно, что светодиодная осветительная система, состоящая из шести параллельно соединенных светодиодов, к каждому из которых подключены резисторы, подключается к шести ШИМ-выходам микроконтроллера. Физически интерфейс USB использует четыре провода: «-5В», «+5В», «D+», «D-». Первые два могут использоваться для питания периферийного устройства (максимальный ток 500 мА). Два последних служат для передачи данных. Таким образом, физическую передачу данных через «D+» и «D-» обеспечивает USB-модуль микроконтроллера.

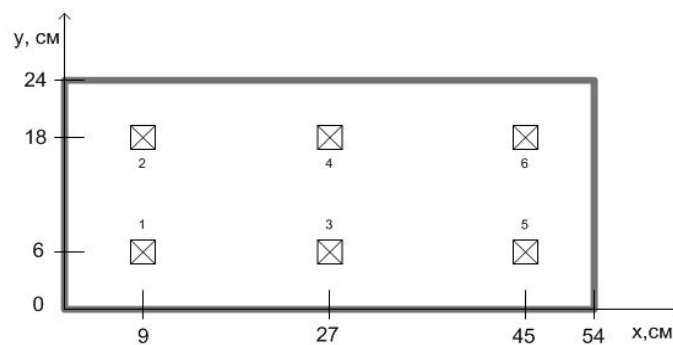


Рис. 2. Расположения светодиодов в пространстве модели помещения

Fig. 2. The location of the LEDs in the room model space

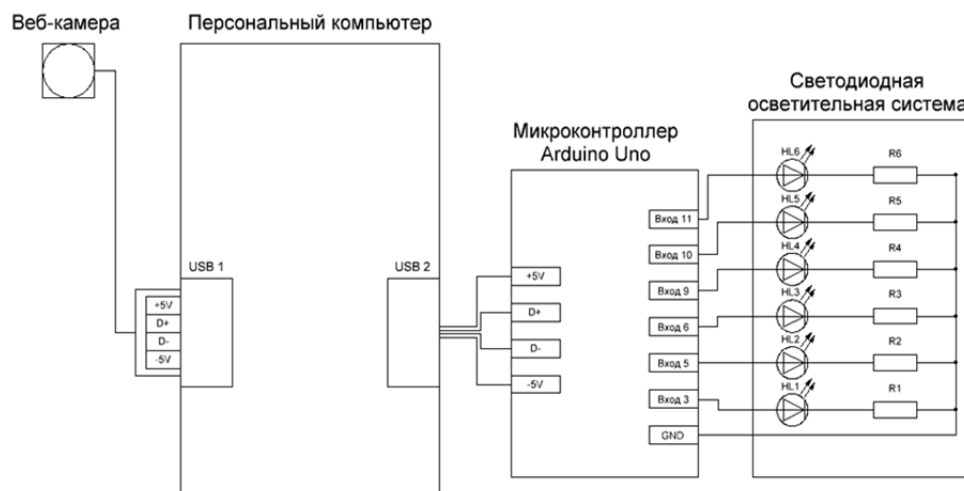


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема

Fig. 3. Schematic circuit

Внешний вид экспериментального макета системы коррекции освещенности офисного помещения приведен на рис. 4.

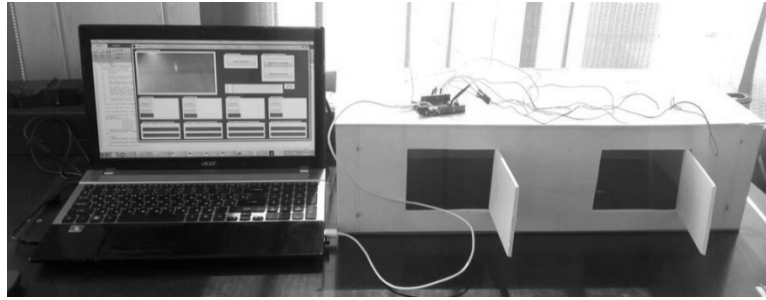


Рис. 4. Внешний вид макета

Fig. 4. The device layout

Для управления работой системы коррекции с использованием веб-камеры было разработано программное обеспечение в среде VisualStudio.Net на языке программирования C#. Данное программное обеспечение работает по следующим алгоритмам: захват изображения, отображение точек измерения, считывание информации в этих точках и управление мощностью светодиодов.

Структурная схема алгоритма захвата изображения и преобразования в оттенки серого представлена на рис. 5.

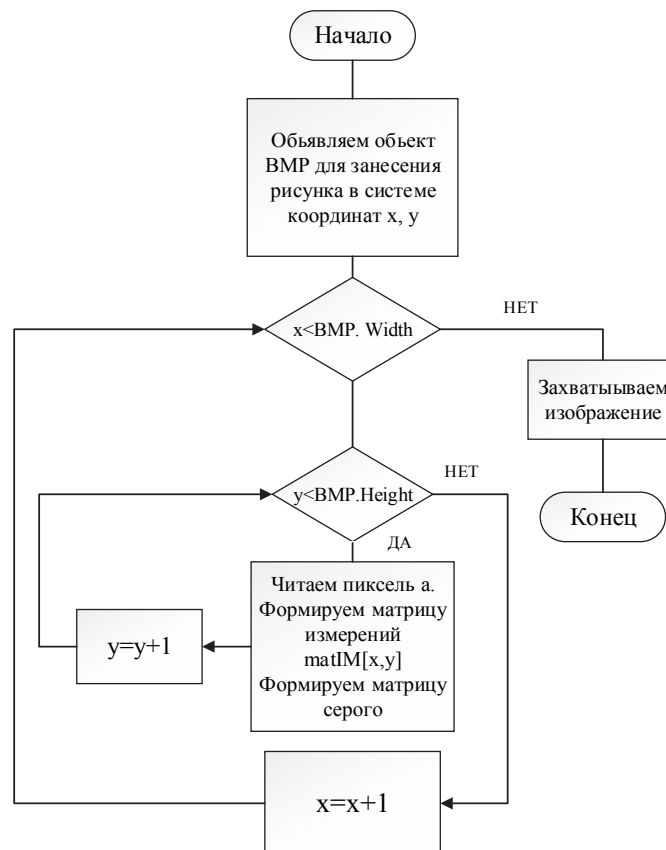


Рис. 5. Блок-схема алгоритма захвата изображения и преобразования

Fig. 5. Flowchart of image capture and conversion

Для реализации алгоритма захвата изображения в программе объявляется объект BMP для занесения изображения реального объекта в системе координат x, y . После этого в двух циклах по пикселям « x » и « y » всё изображение объекта BMP в виде точек записывается в массив измерений $matIm[x,y]$ с суммированием освещенности по RGB. Одновременно формируется изображение для рисунка с преобразованием цветного изображения в оттенки серого. Такое преобразование необходимо для корректного управления освещенностью, так как при разных цветах в помещении освещенность для каждого цвета может быть разной.

Следующий этап заключается в выборе расположения точек измерения. При этом установка осуществляется шесть раз, поскольку в системе имеется шесть светодиодов и, соответственно, шесть мест – измерителей освещенности. Структурная схема алгоритма работы с точками измерения показана на рис. 6.

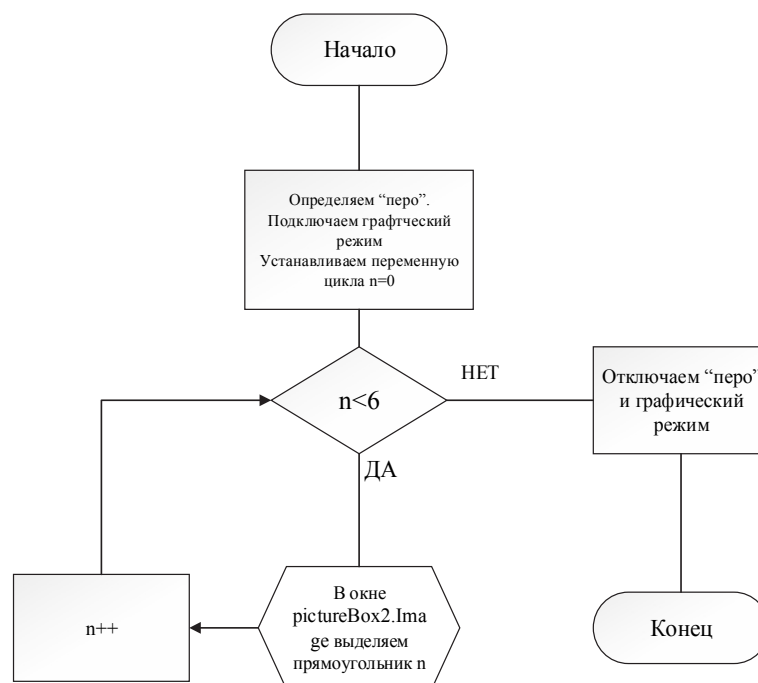


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы с точками измерения

Fig. 6. Flow chart of work with measurement points

Далее осуществляется подключение к порту, где проверяются все устройства, подключенные к USB-портам компьютера. Если в результате поиска обнаружено хотя бы одно устройство, тогда оно высвечивается в приложении. После этого осуществляется открытие порта с автоматическим использованием значений обнаруженного устройства. В заключение производится передача данных – формируется массив байтов для шести светодиодов. Передается информация для каждого светодиода в зависимости от освещенности в шести точках измерения.

Для получения и визуализации экспериментальных данных работы системы коррекции был разработан интерфейс пользователя (рис. 7).

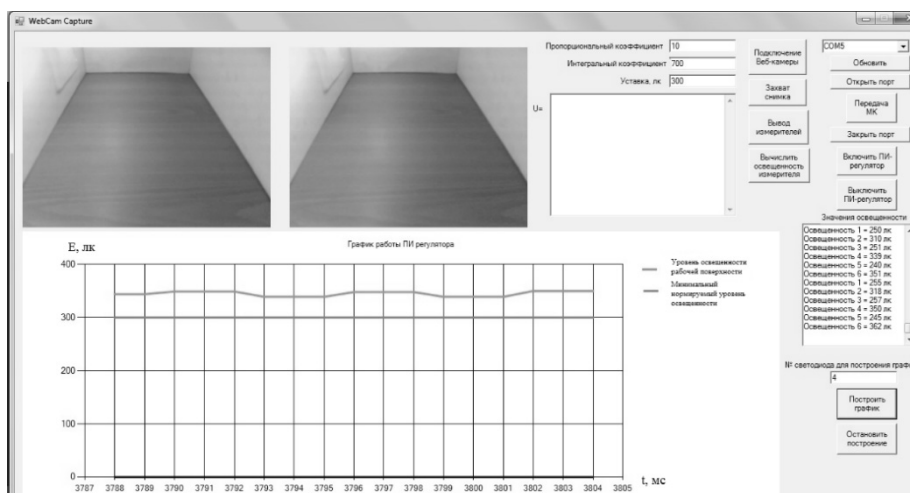


Рис. 7. Рабочее окно приложения

Fig. 7. Application working window

Рабочее окно приложения включает элементы, реализующие описанные алгоритмы. Сначала подключается веб-камера и производится захват снимка. Во время подключения веб-камеры в диалоговом режиме задается тип подключаемой веб-камеры.

После этого в левом верхнем углу окна проекта появляется изображение, снятое веб-камерой, в реальном времени. Предусмотрен захват изображения с помощью манипулятора «мышь». При этом освещенность фиксируется и далее задается левый верхний угол шести прямоугольников, в которых производится определение уровня освещенности (рис. 8). Освещенность, фиксированная веб-камерой, считывается в относительных единицах. В программе заложен алгоритм преобразования значений освещенности в люксы для реального помещения с учетом масштаба макета.



Рис. 8. Изображение точек измерения

Fig. 8. Measuring points image

На следующем этапе производится коррекция работы системы освещения, состоящей из шести светодиодных элементов. В программе для управления режимами светодиодов через микроконтроллер был разработан ПИ-регулятор для каждого светодиода. Путем экспериментальной проверки были определены значения пропорционального и интегрального коэффициентов, которые равны 20 и 300 соответственно. Эти значения вводим в диалоговое окно приложения настройки регулятора. Уровень освещенности устанавливается пользователем и в нашем случае соответствует 300 лк [19].

Определяется номер СОМ-порта, к которому подключен микроконтроллер. При команде «Открыть порт» передается шесть байтов данных для управления светодиодными элементами с помощью микроконтроллера, который при получении команды «Включить регулятор» работает по коррекции освещенности с использованием ПИ-регулятора.

Программно осуществляется автоматический захват изображения через каждые 10 секунд, а далее рассчитывается освещенность для шести заданных участков, после чего осуществляется управление светодиодной осветительной системой.

Во время работы можно наблюдать уровни освещенности, а также отображать их графически для каждого светодиода. Для этого необходимо указать номер области измерения для построения графика.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сначала на основе созданного макета нами были проведены измерения освещенности без системы управления. Снимались значения уровня освещенности в одной из точек измерений рабочего пространства макета при включении всех светодиодов. Соответствующий график представлен на рис. 9. Уровень освещенности рабочей поверхности разработанного макета офисного помещения (верхняя линия) превышает нормируемое значение (нижняя линия), что подтверждает правильность разработки макета со светодиодной системой освещения и веб-камерой в качестве датчика освещенности.

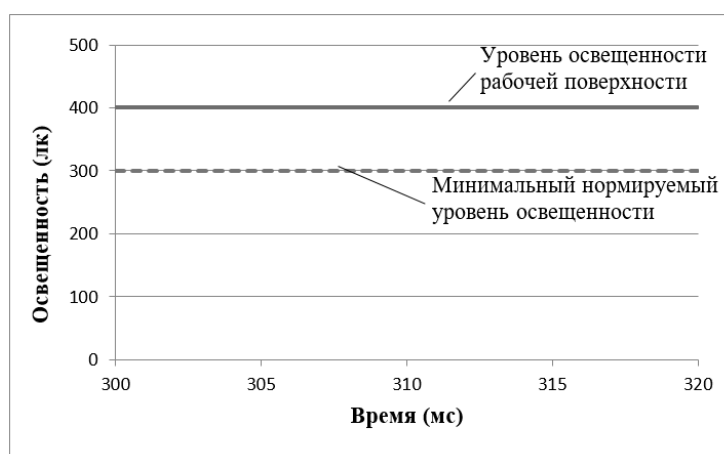


Рис. 9. График освещенности в рабочей плоскости помещения

Fig. 9. Schedule of illumination in the room working plane

Коррекция освещенности светодиодной системы освещения осуществляется при подключении микроконтроллера.

Как было написано выше, в данной системе подключены шесть светодиодных осветительных приборов, подключенных к ШИМ-выходам микроконтроллера, каждый из которых управляется разработанным ПИ-регулятором. На рис. 10 представлен график изменения уровня освещенности при включении регулятора. График имеет неравномерный характер, поскольку значение уровня освещенности колеблется около 350 лк.

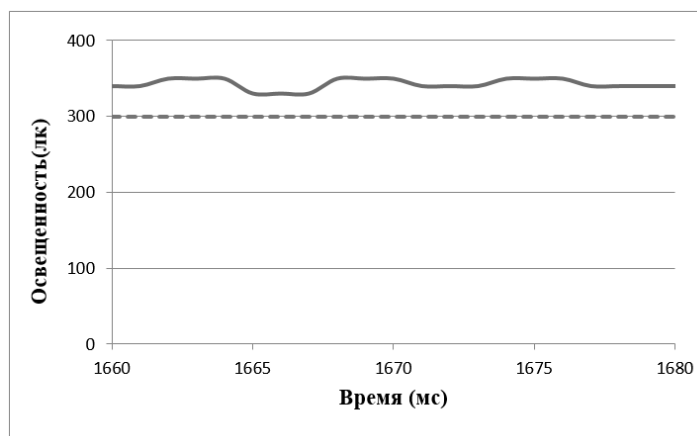


Рис. 10. График освещенности в рабочей плоскости помещения при включении ПИ-регулятора

Fig. 10. Schedule of illumination in the room working plane when the PI controller is turned on

Таким образом, регулируя освещенность рабочей поверхности модели помещения, можно проанализировать равномерность освещения рабочей поверхности и оценить энергоэффективность системы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Измерения позволили провести сравнительный анализ уровней освещенности поверхности рабочего пространства макета офисного помещения до и после коррекции освещенности. Результат измерения средних значений освещенности в заданных областях представлен в виде точечного графика на рис. 11, на котором показано, что до и после коррекции значения освещенности во всех областях измерения превышают минимальный нормируемый уровень освещенности. Уровень освещенности с учетом регулирования (E2) меньше по сравнению с вариантом без регулирования (E1). Тем не менее комфортная световая среда помещения обеспечивается, а потребление электроэнергии снижается приблизительно на 15 %.

Полученные значения подтверждают правильную работоспособность разработанной системы коррекции освещенности светодиодной системы с использованием веб-камеры. Рассмотренная система поддерживает заданный уровень освещенности в заранее выбранных областях рабочей поверхности офисного помещения.

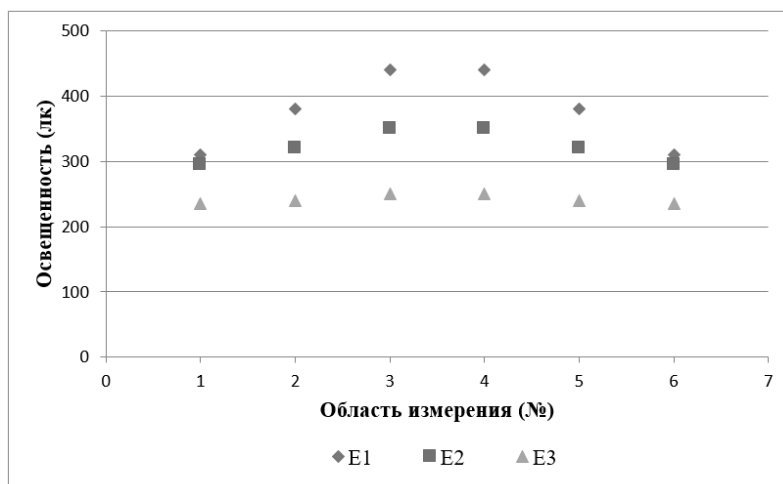


Рис. 11. Среднее значение уровня освещенности рабочей поверхности макета (E1 – без работы системы коррекции; E2, E3 – при работе системы коррекции)

Fig. 11. An average value of the illumination level of the layout working surface (E1 is without the correction system operation, E2, E3 are with the correction system operation)

Однако для критерия полного выравнивания уровня освещенности по всей рабочей поверхности офисного помещения уровень освещенности снижается до 240...250 лк (E3), что не соответствует нормативным требованиям. Для решения этой задачи необходимо увеличивать мощность осветительных приборов по сравнению с теми, которые используются в стандартных офисных помещениях, примерно на 30 %.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа предлагает оптимальную систему для обеспечения равномерного освещения офисных помещений и создания комфортных условий работы человека. Кроме этого, проведенные исследования позволяют решать задачи по созданию бестеневого освещения, необходимого в медицине и ряде отраслей промышленности.

Разработанная система коррекции может быть также использована в новых системах передачи данных с использованием видимого света (VLC) [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тщетные усилия света: стратегии энергоэффективного освещения / Международное энергетическое агентство. – Париж: ОЭСР/МЭА, 2006. – 7 с.
2. Дадонов В.А., Бондарь А.А. Анализ развития и современного состояния рынка светотехники [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – № 5 (29). – С. 1–13. – DOI: 10.18698/2308-6033-2014-5-1225. – URL: <http://engjournal.ru/articles/1225/1225.pdf> (дата обращения: 14.05.2019).

3. Бабко А.Н., Инютин С.П. Энергетический и световой аудит в зданиях, сооружениях и уличном освещении: учебное пособие. – Астана: [б. и.], 2014. – 174 с.
4. Halonen L. Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings. – Finland: Aalto University School of Science and Technology Lighting Unit, 2010. – 376 p.
5. Automatic lighting control system and architecture using ambient light sensor / H.-C. Kang, J.-S. Sung, S.-H. Park, H.-J. Kang, J.-W. Choi, T.-G. Kang // 10th International Conference on Systems. – Barcelona, 2015. – P. 44–45.
6. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Светодиодное освещение – вред здоровью или польза энергосбережению? Спор американских ассоциаций [Электронный ресурс] // Энергосовет. – 2016. – № 3 (45). – С. 33–36. – URL: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=610 (дата обращения: 14.05.2019).
7. Закгейм А.Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья // Светотехника. – 2012. – № 6. – С. 12–21.
8. Сысоева Е.А., Подольная Н.Н. Нормы искусственного освещения: российский и европейский опыт // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 7. – С. 3–11.
9. Развитие российских светодиодных технологий: освещение, биологически адаптированное для человека. Стратегическая программа исследований. – М.; СПб., 2015. – 57 с.
10. Caicedo D., Pandharipande A., Leus G. Occupancy-based illumination control of LED lighting systems // Lighting Research and Technology. – 2011. – N 43. – P. 217–234. – DOI: 10.1177/1477153510374703.
11. Бакланов А.Е., Квасов А.И., Григорьева С.В. Моделирование и экспериментальное изучение размещения светодиодных осветителей офисных помещений // Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева. – 2015. – № 3 (69). – С. 115–122.
12. Caicedo D., Pandharipande A. Daylight and occupancy adaptive lighting control system: an iterative optimization approach // Lighting Research and Technology. – 2016. – N 48, iss. 6. – P. 661–675. – DOI: 10.1177/1477153515587148.
13. Gentile N., Laike T., Dubois M.C. Lighting control systems in individual offices rooms at high latitude: measurements of electricity savings and occupants' satisfaction // Solar Energy. – 2016. – Vol. 127. – P. 113–123.
14. Fuzzy logic controller for energy savings in a smart LED lighting system considering lighting comfort and daylight / J. Liu, W. Zhang, X. Chu, Y. Liu // Energy and Buildings. – 2016. – Vol. 127. – P. 95–104.
15. Study of illumination properties of high-power LEDs in various temperature conditions / Ye. Grigoryev, S. Grigoryeva, V. Sayun, D. Titov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, Russia, 2017. – P. 309–313. – DOI: 10.1109/EDM.2017.7981762.
16. Analysis energy efficiency of automated control system of LED lighting / S. Grigoryeva, A. Baklanov, D. Titov, V. Sayun, E. Grigoryev // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2017). – Astana, Kazakhstan, 2017. – DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998488.
17. DIALuxHelp. Расчет и проектирование освещения [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dialux-help.ru/uchebnik/soderzhanie.html> (дата обращения: 14.05.2019).
18. Григорьева С.В., Григорьев Е.А. Оптимизация размещения светодиодных осветительных приборов для организации равномерного освещения офисных помещений // Студент: наука, профессия, жизнь: материалы II Всероссийской студенческой научной конференции с международным участием. – Омск, 2015. – С. 86–90.
19. Свод правил Республики Казахстан: СП РК 2.04-104-2012. Государственные нормы в области архитектуры, градостроительства и строительства. Естественное и искусственное освещение. – Астана, 2018. – 109 с.
20. Audio transmission system using white LEDs / A. Baklanov, S. Grigoryeva, A. Alimkhanova, E. Grigoryev, V. Sayun // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2019). – Tomsk, Russia, 2019.

Дмитриев Александр Капитонович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерных систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – оптические и лазерных технологии. E-mail: alexander_dmitriev@ngs.ru

Бакланов Александр Евгеньевич, кандидат физико-математических наук по специальности «Радиофизика», ассоциированный профессор кафедры «Приборостроение и автоматизация технологических процессов» Восточно-Казахстанского государственного технического университета. Направления научной деятельности связаны с изучением оптических оптико-электронных приборов и комплексов. E-mail: ABaklanov_62@mail.ru

Саюн Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – современная электроника, модуляционные источники питания. E-mail: svm@ie.tusur.ru

Бакланова Ольга Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры математического и компьютерного моделирования Восточно-Казахстанского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – компьютерное зрение, цифровая фильтрация сигналов и изображений. E-mail: OEBaklanova@mail.ru

Григорьева Светлана Владимировна, доктор философии по направлению «Автоматизация и управление», старший преподаватель кафедры «Приборостроение и автоматизация технологических процессов» Восточно-Казахстанского государственного технического университета. Область научных исследований связана с изучением параметров и режимов работы мощных светодиодов, моделированием систем управления, разработкой программного обеспечения для систем автоматизации. E-mail: SGrigorie-va@ektu.kz

Алимханова Аслима Жеңісқызы, докторант кафедры «Приборостроение и автоматизация технологических процессов» Восточно-Казахстанского государственного технического университета. Область научных исследований – разработка автоматизированных систем с использованием технологии VLC. E-mail: aslima_alim-hanova@mail.ru

Dmitriev Alexander Kapitonovich, D.Sc. (Phys.&Math.), professor at the department of laser systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on optical and laser technologies. E-mail: alexander_dmitriev@ngs.ru

Baklanov Alexander Evgenievich, PhD (Phys.&Math.), an associate professor at the department of instrumentation and automation of manufacturing processes, East Kazakhstan State Technical University. His research activity is related to optical and electron devices and complexes. E-mail: ABaklanov_62@mail.ru

Sayun Vladimir Mikhailovich, PhD (Eng.), an associate professor at the department of industrial electronics, Tomsk State Institute of Control Systems and Radio Electronics. The main field of his research is modern electronics and modulation power supply sources. E-mail: svm@ie.tusur.ru

Baklanova Olga Evgenievna, PhD (Phys.&Math.), professor, department of computer and mathematical modeling, East Kazakhstan State Technical University. Her research interests are focused on computer vision and digital signal and image filtration. E-mail: OEBaklanova@mail.ru

Grigorieva Svetlana Vladimirovna, PhD in automation and control, assistant professor at the department of instrumentation and automation of manufacturing processes, East Kazakhstan State Technical University. Her research activity is focused on parameters and operating modes of powerful LEDs, control system modeling and development of software for automation systems. E-mail: SGrigorieva@ektu.kz

Alikhanova Aslima Zh., postdoctoral student, department of instrumentation and automation of manufacturing processes, East Kazakhstan State Technical University. Her research field is development of automated systems based on the VLC technology. E-mail: aslima_alimhanova@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-7-20

A uniform lighting system using a webcam**A.K. DMITRIEV^{1,a}, A.E. BAKLANOV^{2,b}, V.M. SAYUN^{3,c}, O.E. BAKLANOVA^{2,d},
S.V. GRIGORIEVA^{2,e}, A.ZH. ALIMKHANOVA^{2,f}*¹ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073 Russian Federation*² *East Kazakhstan State Technical University, 69, A.K. Protozanova St., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan*³ *Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 40, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation*^a *alexander_dmitriev@ngs.ru* ^b *ABaklanov_62@mail.ru* ^c *svm@ie.tusur.ru*^d *OEBaklanova@mail.ru* ^e *SGrigorieva@ektu.kz* ^f *aslima_alimhanova@mail.ru***Abstract**

This paper is concerned with the development of a led lighting control system to ensure unvarying shadowless lighting. Ensuring unvarying shadowless lighting is necessary for both employees of medical institutions, for example, during surgical operations, and at enterprises where high-precision equipment is used. The proposed technique of lighting control allows to ensure unvarying illumination in accordance with the regulatory documents and taking into account natural light. The paper proposes a system of illumination correction by controlling led lamps in the office space. Illumination control in the developed system is carried out using a personal computer. For this purpose, the software was developed to correct the illumination of the led lighting system in the Visual Studio.NET environment in the C# language. To test the proposed technique, an experimental installation was developed using the Arduino UNO BOARD card, where a webcam was used as a light sensor. The correction of illumination of the led lighting system was carried out by adding a microcontroller. As a result, a system that maintains a predetermined level of illumination in pre-selected areas of the working surface of premises has been developed.

Keywords: LED lighting, lighting system, webcam, lighting control system, light sensor, Arduino UNO board, microcontroller

REFERENCES

1. *Light's labour's lost: policies for energy-efficient lighting*. International Energy Agency. Paris, OECD/IEA, 2006. 7 p. (In Russian).
2. Dadonov V.A., Bondar A.A. Analiz razvitiya i sovremennogo sostoyaniya rynka svetotekhniki [Analysis of development and current situation on the lighting engineering market]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii – Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, no. 5 (29), pp. 1–13. DOI: 10.18698/2308-6033-2014-5-1225. Available at: <http://engjournal.ru/articles/1225/1225.pdf> (accessed 14.05.2019).
3. Babko A.N., Inyutin S.P. *Energeticheskii i svetovoi audit v zdaniyakh, sooruzheniyakh i ulichnom osveshchenii* [Energy and light audit in buildings, structures and street lighting]. Astana, 2014. 174 p.
4. Halonen L. *Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings*. Finland, Aalto University School of Science and Technology Lighting Unit, 2010. 376 p.
5. Kang H.-C., Sung J.-S., Park S.-H., Kang H.-J., Choi J.-W., Kang T.-G. Automatic lighting control system and ambient light sensor. *10th International Conference on Systems*, Barcelona, 2015, pp. 44–45.
6. Kaptsov V.A., Deinego V.N. Svetodiodnoe osveshchenie – vred zdorov'yu ili pol'za energosberezheniyu? Spor amerikanskikh assotsiatsii [LED lighting – harm to health or benefits of energy saving? Dispute of American Associations]. *Energosovet*, 2016, no. 3 (45), pp. 33–36. Available at: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=610 (accessed 14.05.2019).
7. Zakgeim A.L. Svetodiodnye sistemy osveshcheniya: energoeffektivnost', zritel'noe vospriyatie, bezopasnost' dlya zdorov'ya [led lighting systems: energy efficiency, visual perception, safety for health]. *Svetotekhnika – Light & Engineering*, 2012, no. 6, pp. 12–21.

* Received 14 January 2019.

8. Sysoeva E.A., Podol'naya N.N. Normy iskusstvennogo osveshcheniya: rossiiskii i evropeiskii opyt [Standards of artificial lighting: Russian and European experience]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti – Life safety*, 2018, no. 7, pp. 3–11.
9. *Razvitie rossiiskikh svetodiodnykh tekhnologii: osveshchenie, biologicheskii adaptirovannoe dlya cheloveka. Strategicheskaya programma issledovaniy* [The development of Russian LED technology: lighting, biologically adapted for humans. Strategic research program]. Moscow, St. Petersburg, 2015. 57 p.
10. Caicedo D., Pandharipande A., Leus G. Occupancy-based illumination control of LED lighting systems. *Lighting Research and Technology*, 2011, no. 43, pp. 217–234. DOI: 10.1177/1477153510374703.
11. Baklanov A.E., Kvasov A.I., Grigor'eva S.V. Modelirovanie i eksperimental'noe izuchenie razmeshcheniya svetodiodnykh osvetitelei ofisnykh pomeshchenii [Modeling and experimental study of the placement of LED illuminators for office premises]. *Vestnik VKGTU im. D. Serikbaeva – Vestnik of D. Serikbaev EKSTU*, 2015, no. 3 (69), pp. 115–122.
12. Caicedo D., Pandharipande A. Daylight and occupancy adaptive lighting control system: an iterative optimization approach. *Lighting Research and Technology*, 2016, vol. 48, iss. 6, pp. 661–675. DOI: 10.1177/1477153515587148.
13. Gentile N., Laike T., Dubois M. Lighting control systems in individual offices rooms at high latitude: measurements of electricity savings and occupants' satisfaction. *Solar Energy*, 2016, vol. 127, pp. 113–123.
14. Liu J., Zhang W., Chu X., Liu Y. Fuzzy logic controller for energy savings in a smart LED lighting system considering lighting comfort and daylight. *Energy and Buildings*, 2016, vol. 127, pp. 95–104.
15. Grigoryev Ye., Grigoryeva S., Sayun V., Titov D. Study of illumination properties of high-power LEDs in various temperature conditions. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, Russia, 2017, pp. 309–313. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981762.
16. Grigoryeva S., Baklanov A., Titov D., Sayun V., Grigoryev E. Analysis energy efficiency of automated control system of LED lighting. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2017)*. Astana, Kazakhstan, 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998488.
17. *DIALuxHelp. Raschet i proektirovanie osveshcheniya* [DIALux Help. Calculation and design of lighting]. Available at: <http://www.dialux-help.ru/uchebnik/soderzhanie.html>. (accessed 14.05.2019).
18. Grigoryeva S.V., Grigoryev E.A. [Optimizing the placement of LED lighting products, to organize uniform office lighting]. *Student: nauka, professiya, zhizn': materialy II Vserossiiskoi studentcheskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings 2nd Russian Student Scientific Conference with international participation “Student: science, profession, life”]. Omsk, Russia, 2015, pp. 86–90. (In Russian).
19. *Svod pravil Respubliki Kazakhstan: SP RK 2.04-104-2012. Gosudarstvennye normativy v oblasti arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'stva. Estestvennoe i iskusstvennoe osveshchenie* [The rules of the Republic of Kazakhstan: SP RK 2.04-104-2012. Government regulations in the field of architecture, urban planning and construction. Natural and artificial lighting]. Astana, 2018. 109 p.
20. Baklanov A., Grigoryeva S., Alimkhanova A., Grigoryev E., Sayun V. Audio transmission system using white LEDs. *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2019)*, Tomsk, Russia, 2019.

Для цитирования:

Система обеспечения равномерного освещения с использованием веб-камеры / А.К. Дмитриев, А.Е. Бакланов, В.М. Саюн, О.Е. Бакланова, С.В. Григорьева, А.Ж. Алимханова // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-7-20.

For citation:

Dmitriev A.K., Baklanov A.E., Sayun V.M., Baklanova O.E., Grigoryeva S.V., Alimkhanova A.Zh. Sistema obespecheniya ravnomernogo osveshcheniya s ispol'zovaniem veb-kamery [Uniform lighting system using a webcam]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 7–20. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-7-20.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.82

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36

Разработка и оценка онтологии социокиберфизической системы на основе анализа типовых сценариев использования мобильных роботов*

Д.М. КАЛЯЗИНА^{1,a}, А.М. КАШЕВНИК^{2,b}

¹ 197101, РФ, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

² 199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

^a darya.kalyazina@mail.ru ^b alexey@iias.spb.su

В статье рассмотрены типовые сценарии использования мобильных роботов, охватывающие основные процессы, возникающие при их взаимодействии: уборка помещения с помощью автономных роботов-пылесосов; взаимодействие двух роботов для сборки объекта из компонентов, а также взаимодействие робота-манипулятора и робота-измерителя с целью исследования местности, преодоления препятствий и проведения манипуляций. Среди основных процессов, возникающих в таких сценариях, можно выделить информационное взаимодействие роботов, совместное выполнение роботами задачи, привлечение человека к выполнению задачи. В работе представлено подробное описание онтологии социокиберфизической системы на основе анализа вышеперечисленных сценариев. В статье также рассмотрены правила оценки онтологий, представлено описание существующих методов оценки с разделением их на классы в зависимости от средств анализа онтологии, а также описаны задачи, которые необходимо выполнить при проведении оценки. Затем была выполнена оценка разработанной онтологии на основе метода исследования топологии графа. Полученные значения по ключевым показателям, таким как количество различных циклов в графе, количество вершин, имеющих несколько родителей, отнесенное к количеству вершин в графе, отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам, среднее квадратичное отклонение степени вершины графа, удовлетворяют заданным граничным значениям оценки. В связи с этим можно сделать вывод, что разработанная онтология не имеет критических проблем. Однако ряд значений основных показателей превышает ожидаемые (например, максимальное отношение ширины соседних уровней, среднее квадратичное отклонение детей листьев у предпоследних вершин в графе, среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину). Следовательно, предполагается дальнейшая работа по доработке онтологии.

* Статья получена 26 октября 2018 г.

Исследование выполнено в СПИИРАН при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-29-04349 и 19-07-00670, а также бюджетной темы № 0073-2019-0005.

Планируется провести анализ критериев, которые не соответствуют предъявляемым требованиям, затем предложить возможные варианты улучшения онтологии. Также необходимо провести обзор редакторов и выбрать систему логического вывода для проведения дальнейшего исследования, направленного на внедрение онтологии в сценарии взаимодействия роботов.

Ключевые слова: социокберфизическая система, мобильные роботы, онтология, онтограф, оценка онтологии, методы оценки онтологий, информационное взаимодействие, робототехника

ВВЕДЕНИЕ

Одним из возможных подходов к представлению знаний является онтологический подход. Подход применяется для формализации различных предметных областей и поддержки семантической интероперабельности между взаимодействующими сущностями. Онтологический подход широко используется в системах различного класса. Не являются исключением и социокберфизические системы, которые в настоящее время получают всё большую и большую популярность. Такие системы используются для решения широкого круга задач с привлечением интеллектуальных агентов и людей [1]. При этом одной из важнейших задач в таких системах является организация информационного взаимодействия между роботизированной системой и человеком.

В последнее время исследования в области групповых робототехнических систем набирают всё большую популярность [2, 3]. Взаимодействие робот–человек необходимо для реализации задач, которые невозможно решить без участия роботов и людей одновременно. При этом онтологический подход позволяет автоматизировать такое взаимодействие путем обеспечения интероперабельности при информационном взаимодействии мобильных роботов со смартфоном человека.

Таким образом, основной задачей исследования является формализация основных сущностей и процессов, протекающих в социокберфизической системе посредством разработки онтологической модели такой системы, а также оценка качества разработанной модели.

Для разработки онтологии были выделены типовые сценарии в системах такого класса. После разработки онтологии проведена ее оценка, которая показала, что разработанная онтология не имеет критических проблем и в целом удовлетворяет основным показателям оценки.

Статья состоит из следующих разделов: в первом разделе описаны рассмотренные типовые сценарии использования мобильных роботов. Во втором разделе рассмотрено понятие онтологии и онтологического подхода, а также представлена разработанная онтология социокберфизической системы. Третий раздел посвящен описанию существующих методов анализа онтологий и выбору метода оценки разработанной онтологии. В четвертом разделе описана оценка разработанной онтологии и представлены предложения по ее улучшению. В заключении указаны общие результаты и выводы по изложенному в статье материалу.

1. ТИПОВЫЕ СЦЕНАРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Были выделены три типовых сценария, наилучшим образом характеризующие взаимодействие мобильных роботов в социокиберфизических системах.

1. Сценарий уборки помещения автономными роботами-пылесосами в умном доме (сценарий подробно описан авторами в работе [4]).

Роботы-пылесосы создают совместную карту помещения с помощью видеокамер и датчиков и совместно выполняют уборку, обмениваясь информацией о том, какая часть помещения уже обработана. При этом каждый робот организывает взаимодействие с другими устройствами, которые принимают участие в сценарии, а именно:

- с мобильными пользовательскими устройствами (смартфонами), которые используются для указания целей и ограничений, а также общих требований, таких как режим энергосбережения, режим чистки и т. д.;

- с роботами-манипуляторами, выполняющими перемещение предметов интерьера (например, стульев) для эффективной уборки;

- с другими роботами-пылесосами для распределения задачи уборки помещения;

- с адаптивной системой управления светом, обеспечивающей возможность использования светочувствительных датчиков роботами-пылесосами.

2. Сценарий взаимодействия роботов для сборки объекта из компонентов (сценарий и реализация его прототипа подробно описана авторами в работе [5]).

В рамках данного сценария пользователь задает модель объекта в интеллектуальном пространстве, а роботы получают доступ к этой модели и возможности распределения задач между собой. Прделанная каждым роботом работа в режиме реального времени отображается в интеллектуальном пространстве, что позволяет остальным роботам оперировать в пространстве, имея целостную картину.

3. Взаимодействие робота-манипулятора и робота-измерителя для преодоления препятствий, исследования местности и проведения манипуляций (сценарий и его реализация подробно описана авторами в работе [6]);

Робот-манипулятор передвигается по пересеченной местности и может встретить препятствия на своем пути. Робот имеет шесть крутящихся колес и может поднимать передние и заднее шасси для преодоления препятствий, которые больше радиуса его колеса. Если на пути робота находится препятствие, то участвующий в сценарии робот-измеритель выполняет его сканирование. На основе измеренных характеристик препятствия робот-манипулятор преодолевает его в автоматическом режиме (если существует соответствующий алгоритм) или в ручном режиме благодаря помощи оператора-человека, который в этом случае осуществляет ручное управление роботом.

2. ОНТОЛОГИЯ СОЦИОКИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Онтология – это подробная спецификация модели предметной области, она включает в себя словарь (т. е. список логических констант и предикатных символов) для описания предметной области и набор логических высказыва-

ний, формулирующих существующие в данной проблемной области ограничения и определяющих интерпретацию словаря [7]. В ходе исследования была разработана онтология, состоящая из трех основных разделов: Physical Space, Information Space и Social Space. Разработанная онтология представлена на рис. 1. Рассмотрим онтологию более подробно. Класс Physical Space описывает материальные объекты физического пространства, класс Information Space – виртуальные объекты информационного пространства, а класс Social Space – людей, участвующих в человеко-машинном взаимодействии.

Рассмотрим более подробно часть онтологии, относящуюся к классу Physical Space. Класс содержит описание физических объектов, включает следующие подклассы: Collection, Device и Environment. Класс Collection характеризует совокупность устройств, которые представляют собой участников социокиберфизической системы (например, роботов). Класс Device представляет собой описание устройств, которые оперируют в физическом пространстве, и состоит из следующих подклассов: Connect_Interface, Battery, Hull, Motor, Sensor, Switch, Wheel.

Класс Connect_Interface характеризует виды подключений, которые могут применяться в системе для реализации взаимодействия между объектами. Подклассом класса Connect_Interface является Wirelessinterface. Данный класс описывает варианты беспроводного интерфейса, он включает подклассы Bluetooth и WiFi. Класс Bluetooth определяет обмен информацией между устройствами, расположенными на близком расстоянии друг от друга, с помощью радиоволн. Класс WiFi также является стандартом радиосвязи и позволяет обеспечить обмен информацией, однако, по сравнению с Bluetooth, сеть покрывает большее расстояние.

Класс Motor описывает двигатели, используемые для работы устройств. Класс Sensor характеризует датчики устройств. Подклассы класса Sensor описывают датчики различных типов: класс DistanceSensor – датчики расстояния, класс HeatSensor – датчики температуры, класс LightSensor – датчики света, класс TouchSensor – датчики касания. Класс Wheel содержит данные о типах колес, используемых устройствами. Класс Battery определяет блоки питания, установленные в устройствах. Класс Switch описывает вид используемого в устройстве переключателя. Класс Environment определяет параметры среды, в которой исполняются сценарии.

Далее рассмотрим объекты информационного пространства. Класс Information Space описывает информационные объекты системы и состоит из следующих подклассов: CompetenceProfile, Configuration, Context, Policy, Interaction, Process, Agent, Human_profile, Resource и Resource_profile. Класс CompetenceProfile описывает компетенции людей и роботов. Класс состоит из подкласса History, содержащего параметры, которые можно задать при исполнении сценариев. Также класс включает описание результатов выполненных сценариев. Класс Agent описывает программное обеспечение, которое управляет Resource и Device. Класс Configuration содержит описание набора настроек и компонентов, которые должны быть учтены в информационном пространстве. Класс Context содержит разнобразную информацию, которая характеризует окружение, в котором находятся объекты социокиберфизической системы. Класс состоит из двух

подклассов: ResourceContext, определяющего специфику окружения устройства, и EnvironmentContext, включающего сведения о внешней среде. Класс EnvironmentContext разделяется на подклассы Spatial и Temporal.

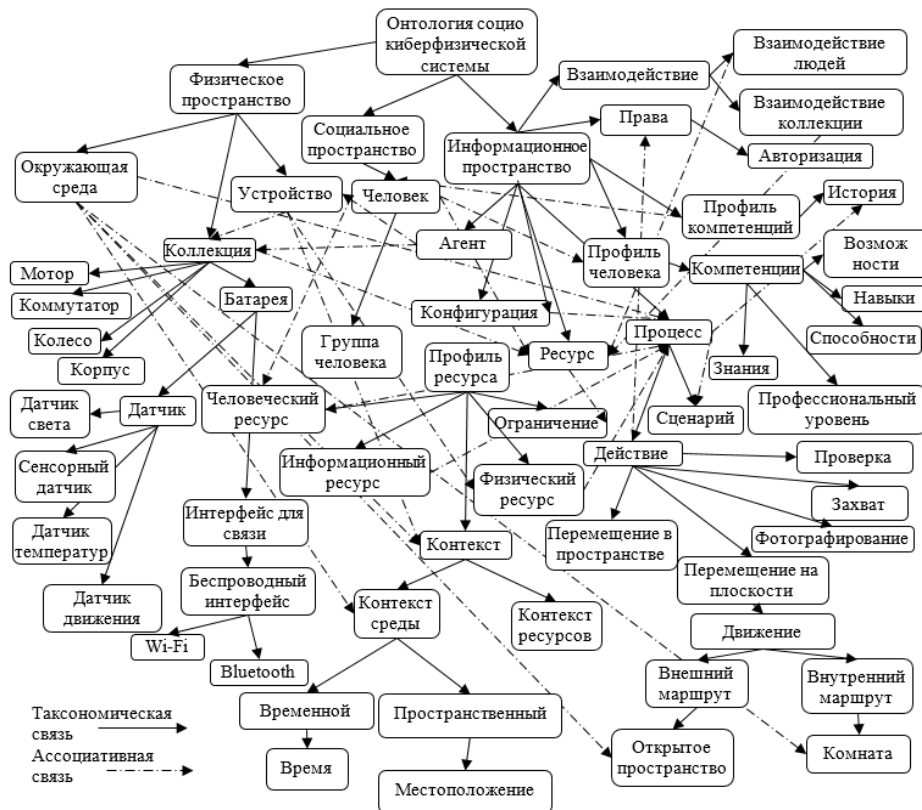
Класс Spatial дает описание пространства и включает подкласс Location, который описывает расположение объектов системы в пространстве. Класс Temporal определяет временные характеристики и включает подкласс Time, который определяет промежутки времени, связанные с исполнением сценариев.

Класс Human_profile содержит описание компетенций человека как одного из объектов социокиберфизической системы. Human_profile включает подкласс Competency. Класс Competency описывает основные свойства, которые могут характеризовать человека-эксперта: Opportunities, Proficiency_level, Capabilities, Skills и Knowledge. Класс Opportunities определяет возможности эксперта. Класс Proficiency_level содержит информацию о квалификации эксперта. Класс Capabilities определяет характеристики, которым должен соответствовать эксперт. Класс Skills – навыки, необходимые для реализации задач.

Класс Interaction описывает виды взаимодействий – HumanInteraction и CollectionInteraction. Объекты системы могут взаимодействовать для совместного решения задач. Класс CollectionInteraction описывает взаимодействие нескольких роботов, а HumanInteraction – взаимодействие робота и человека.

Класс Policy определяет права и возможности объектов системы. Класс содержит подкласс Autorization. Класс Autorization определяет правила авторизации объектов в системе.

Класс Process содержит описание процессов, которые могут быть исполнены системой. Process включает подкласс Scenario, содержащий сценарии, которые могут быть выполнены объектами системы. Класс Scenario содержит подкласс Action. Класс Action описывает функции, которые может выполнять Resource. Класс состоит из подклассов: Movement, Photo, Grip, Fly, Check. Класс Movement включает варианты маршрута – Route (IndoorRoute, OutdoorRoute). IndoorRoute описывает маршрут внутри помещения, включает подкласс Room. Класс OutdoorRoute характеризует маршрут вне помещения, на местности, включает подкласс OpenSpace. Класс Photo характеризуют функцию устройства, позволяющую делать снимки. Класс Grip определяет способы захвата предметов устройством во время исполнения сценариев. Класс Fly описывает функциональность полета мобильного робота. Класс Check – проверка, которая позволяет устройству отличать предметы с особыми характеристиками. Таким образом, Action представляет описание функций Resource. Класс Resource описывает коллекции физических объектов. Класс Resource_profile содержит описание ресурсов системы, включает подклассы: Human_resource, Information_resource, Physical_resource, а также Constraint. Класс Human_resource содержит описание человеческих ресурсов, представленных в системе; класс Information_resource – описание информационных ресурсов; класс Physical_resource – описание физических ресурсов. Класс Constraint содержит ограничения, которые должны быть учтены в системе.



Онтология социокиберфизической системы

Cyber-physical-social system ontology

Классификация Social Space определяет социальную часть онтологии – третье пространство, включающее описание человека – одного из объектов социокиберфизической системы. Social Space состоит из класса Human, содержащего сведения о людях, которые могут участвовать в исполнении сценариев. Класс Human включает подкласс Human_group. Класс Human_group определяет группы экспертов, формируемые с учетом различных характеристик, таких как профессия, навыки, требования.

3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНКИ ОНТОЛОГИИ СОЦИОКИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В последнее время онтологический подход широко применяется в различных сферах (например, для выборки информации, объединения данных). В связи с этим появляется необходимость оценивать разрабатываемые онтологии. На данный момент данное направление является новым, существуют методы и шаблоны оценки онтологий. Например, в работах [8, 9] выделен ряд шагов, которые необходимо выполнить:

- выделить точку зрения, с которой следует формировать модель;
- выбрать параметры оценки;
- выбрать методику;

- выполнить оценку;
- подвести итоги, выводы по модели.

Также выделяются классы методов оценки в зависимости от средств анализа онтологий:

- анализ данных;
- оценки специалистов;
- по профилю применения;
- сопоставление с «золотым стандартом»;
- рассмотрение онтографа.

Методы, основанные на анализе данных, связаны с экспертными системами. Наиболее значимый компонент в такой системе – это база знаний. Полнота и непротиворечивость представленных в ней знаний определяет качество экспертной системы. В свою очередь, онтология может формировать основу экспертной системы, содержать ключевые понятия. Также онтология может являться основой объединения фактических знаний из базы знаний, которые требуются для работы экспертной системы [10].

Оценки специалистов – это совокупность мнений людей, компетентных в какой-либо сфере. На первом этапе составляется список критериев, на втором – проводится опрос [11].

Метод исследования профиля применения заключается в конкретизации интересов пользователя; профиль пользователя – структура, определенная на множестве интересов-категорий онтологии [12].

Метод сопоставления с «золотым стандартом» подразумевает нахождение мер подобия между подготовленной онтологией и уже существующей, принятой за эталон. Сходство между онтологиями вычисляют с помощью функции подобия [13]: $\text{sim}: O \times O \rightarrow [0, 1]$.

Метод рассмотрения онтографа заключается в рассмотрении основных показателей, связанных со структурой разработанной онтологии [14].

После рассмотрения существующих методов оценки онтологий был выбран метод рассмотрения топологии онтографа. Данный метод соответствует поставленной авторами цели оценки онтологии – выявление «узких» мест исходя из измеряемых показателей и выработка идей улучшения онтологии.

4. ОЦЕНКА ОНТОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

При подготовке оценки были выделены следующие метрики, определяющие оценку разработанной онтологии: в табл. 1 представлены метрики, связанные с размерами онтологии, в табл. 2 – метрики, выявляющие критические ошибки онтологии, в табл. 3 – значения метрик Ингве–Миллера, которые связаны с эргономикой и восприятием онтологий.

Отметим, что такие показатели, как полнота и достаточность онтологии, достаточно сложно интерпретировать. Одинаковый набор фактов может быть истолкован по-разному в зависимости от рассматриваемых в ходе исследования вопросов. В данной статье рассматривается только показатель точности словаря предметной области, так как подготовленную онтологию планируется дополнять в зависимости от полученных результатов оценки.

Рассмотрим показатели, представленные в табл. 1. Показатель «Количество вершин графа онтологии» представляет собой совокупность всех классов онтологии; показатель «Максимальное расстояние от корневого узла онтологии» – подсчет всех дуг, в данном случае от класса Thing до подкласса Room класса Information Space. Одной из метрик, рассчитанных в табл. 1, является «Количество листьев дерева онтологии». Лист дерева онтологии (терминальная вершина) – одна из вершин корневого дерева, из листьев которого не выходит ни одна дуга [15]. Таким образом, производится подсчет всех классов, у которых нет подклассов. Для расчета показателя «Количество вершин дерева онтологии, у которых есть листья в непосредственных потомках» производится подсчет от класса Thing всех классов, у которых есть подклассы с последующими отношениями. Показатель «Количество дуг графа онтологии» – это совокупность всех связей между классами и подклассами онтологии (is_a, associated with).

Далее рассмотрим показатели табл. 2, содержащей значения метрик, выявляющих критические ошибки онтологии. Цикл графа – путь, в котором начальная и конечная вершины совпадают. Длиной цикла называется число ребер в данном цикле [16]. Отметим, что в разработанной онтологии граф не содержит циклов. Также в ней отсутствуют вершины с несколькими родителями. Показатель «Количество вершин онтологий, имеющих листья среди детей» совпадает с показателем «Количество вершин дерева онтологии, у которых есть листья в непосредственных потомках» предыдущей таблицы. Получить значение «Количество вершин онтологий, имеющих только детей-листья» возможно благодаря подсчету вершин с подклассами, не имеющими выходящих дуг. Значение последнего показателя табл. 2 рассчитывается как отношение вершин, у которых имеются листья и нелистовые вершины, к показателю «Количество вершин онтологий, имеющих листья среди детей».

Далее рассмотрим показатели табл. 3, включающей в себя значения метрик Ингве–Миллера. Закономерность Ингве–Миллера заключается в возможности запомнить не более семи-девяти элементов одновременно (7 ± 2) [9].

Степень вершины – это количество дуг, выходящих из этой вершины; при этом авторы работы [9] замечают, что вершины с нормальной степенью – это такие вершины, у которых общее значение входящих и исходящих ребер не более девяти. В подготовленной онтологии показатель «Отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам» равен 1, т. е. все вершины онтологии в данном случае с нормальной степенью.

Под средней степенью вершины графа понимают значение ребер графа, проходящих через вершину [17].

Медиана – это некоторое значение, характеризующее выборку или набор чисел [18]. Показатель «Медиана степени вершины графа» дает определение вершине графа онтологии и рассчитывается при помощи расположения элементов выборки от большего к меньшему (или наоборот) и расчету среднего элемента. Показатель «Среднее квадратичное отклонение степени вершины графа» – это значение распределения показателей случайной величины относительно ее математического ожидания [18].

Таблица 1

Table 1

Значения метрик размера онтологии**Value of ontology size metrics**

Метрика	Значение
Количество вершин графа онтологии	65
Максимальное расстояние от корневого узла онтологии	8
Количество листьев дерева онтологии	32
Количество вершин дерева онтологии, у которых есть листья в непосредственных потомках	14
Количество дуг графа онтологии	99

Таблица 2

Table 2

Значения метрик, выявляющих критические ошибки онтологии**Values of metrics that show critical errors in ontologies**

Метрика	Значение
Количество различных циклов в графе	0
Количество вершин с несколькими родителями	0
Количество вершин онтологий, имеющих листья среди детей	14
Количество вершин онтологий, имеющих только детей-листья	12
Количество вершин, у которых есть и листья, и нелистовые вершины в качестве детей по отношению ко всему количеству вершин, у которых есть листья среди детей	1,9

Таблица 3

Table 3

Значения метрик Ингве–Миллера**Values of Ingve–Miller metrics**

Метрика	Значение
Отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам	1
Средняя степень вершины графа	3,19
Медиана степени вершины графа	3,2
Среднее квадратичное отклонение степени вершины графа	0,99

Рассмотрим табл. 4 с описанием значений метрик глубины. Показатель «Минимальная глубина» измеряется с помощью подсчета кратчайшего пути от класса Thing до листа графа. Показатель «Максимальная глубина» – подсчет наиболее длинного пути от класса Thing до листа графа. Показатель «Средняя глубина» рассчитывается как отношение показателя «Абсолютная глубина» к количеству дуг онтологии вида «is-a». Показатель «Абсолютная глубина» – это сумма длин всех путей графа (где путь – это любая последова-

тельность соединенных между собой вершин, начинающаяся от корневой вершины и заканчивающаяся листом графа.

В данном случае показатель «Медиана глубины» определяет варианты глубины графа онтологии, т. е. показатель рассчитывается структурирование элементов выборки по возрастанию с взятием среднего. Последний показатель табл. 4 – это среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину.

В таблице 5 описываются значения метрик ширины. Рассмотрим следующие показатели. Показатель «Средняя ширина» – это отношение показателя «Абсолютная ширина» к количеству уровней иерархии. Показатель «Абсолютная ширина» – это сумма вершин для каждого уровня иерархии по всем уровням. Показатель «Максимальная ширина» равен количеству вершин на самом большом по количеству вершин уровне. Показатель «Среднее отношение ширины соседних уровней» является дополнительной метрикой оценки ширины онтологии. Показатель «Максимальное отношение ширины соседних уровней» – это метрика, включенная в анализ основных метрик, в рамках которой производится подсчет вершин по каждому уровню онтологии [9]. Показатель «Среднее квадратичное отклонение отношения ширины соседних уровней графа по отношению к среднему отношению ширины соседних уровней» характеризует рассеивание значений случайной величины относительно ее математического ожидания к среднему отношению ширины соседних уровней [18].

В таблице 6 представлены показатели значения метрик ветвистости. Рассмотрены показатели: «Среднее количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе», «Максимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе», «Минимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе» и «Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе». Показатель «Среднее количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе» вычисляется как среднее арифметическое количества подклассов у предпоследних вершин графа онтологии. Показатель «Максимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе» учитывает наибольшее количество подклассов у класса, являющегося предпоследним в графе.

Таблица 4

Table 4

Значения метрик глубины

Values of depth metrics

Метрика	Значение
Минимальная глубина	3
Максимальная глубина	8
Средняя глубина	2,507
Медиана глубины	3
Среднее квадратичное отклонение глубины	4,3
Среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину	1,72

Таблица 5

Table 5

Значения метрик ширины**Values of wideness metrics**

Метрика	Значение
Средняя ширина	8
Среднее отношение ширины соседних уровней	9,5
Максимальная ширина	19
Максимальное отношение ширины соседних уровней	16,5
Среднее квадратичное отклонение отношения ширины соседних уровней графа по отношению к среднему отношению ширины соседних уровней	0,511

Таблица 6

Table 6

Значения метрик ветвистости**Values of branching metrics**

Метрика	Значение
Среднее количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе	2
Максимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе	5
Минимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе	1
Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе	10,6

Таблица 7

Table 7

Оценки основных метрик для разработанной онтологии**Values of the main metrics for developed ontology**

Метрика	Значение
Количество различных циклов в графе	0
Количество вершин, имеющих несколько родителей, деленное на количество вершин в графе	0
Количество вершин, у которых есть и листья, и нелистовые вершины в качестве детей, по отношению ко всему количеству вершин, у которых есть листья среди детей	1,9
Отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам	1
Среднее квадратичное отклонение степени вершины графа	0,99
Среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину	1,72
Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе	10,6
Максимальное отношение ширины соседних уровней	16,5

Показатель «Минимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе» учитывает наименьшее количество подклассов у класса, являющегося предпоследним в графе. Показатель «Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе» определяет степень рассеивания значений случайной величины относительно ее математического ожидания.

Таким образом, были даны оценки основным метрикам онтологии. Наиболее важные представлены в табл. 7. Отметим, что критических ошибок подготовленная онтология не содержит, так как показатели «Количество различных циклов в графе» и «Количество вершин, имеющих несколько родителей, деленное на количество вершин в графе» имеют нулевые значения. Также важными являются показатель «Количество вершин, у которых есть и листья, и нелистовые вершины в качестве детей, по отношению ко всему количеству вершин, у которых есть листья среди детей», равный 1,9, и показатель «Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе», равный 10,6. Оба показателя характеризуют равномерность распределения вершин графа. Исходя из полученных результатов вершины графа распределены в онтологии неравномерно, последний уровень онтологии недостаточно сбалансирован. Показатель «Отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам» относится к метрикам когнитивной эргономичности и равен 1. Таким образом, все вершины онтологии являются вершинами с нормальной степенью, а суммарное число входящих и исходящих ребер для каждой не превышает 9, что соответствует числу Ингве–Миллера (7 ± 2). Остальные показатели, представленные в табл. 7, являются дополнительными статистическими метриками. Они не являются обязательными, однако эксперты отмечают их универсальность, рекомендуют использовать в расчетах. Показатель «Среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину» равен 1,72. Отметим, что максимальная глубина состоит из восьми концептов, т. е. показатель соответствует требованиям эргономичности. Однако полученное значение предполагает дополнительный анализ веток онтологии. Абсолютное значение показателя «Среднее квадратичное отклонение степени вершины графа» равно 0,99, что отвечает требованию меньшего количества концептов, не соответствующих структуре онтологии. Показатель «Максимальное отношение ширины соседних уровней» – это обязательный показатель при формировании оценки онтологии. Предпочтительнее, чтобы значения показателя были небольшими. Отметим, что в данном случае значение 16,5 предполагает дополнительную проверку уровней иерархии онтологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты разработки и оценки онтологии социо-киберфизической системы для функционирования на ее основе сценариев, ориентированных на совместную работу мобильных роботов. При подготовке онтологии были рассмотрены понятия онтологии и онтологического подхода, представлены типовые сценарии использования мобильных роботов, затем дано описание концептов и отношений разработанной онтологии. Далее были рассмотрены методы оценки и выбран метод исследования топологии графа. Проведенная оценка подтверждает валидность онтологии и отсутствие в ней критических ошибок. Однако часть полученных показателей недостаточно соответствует ожидаемым результатам. Отметим, что три показателя из пере-

численных зависят от масштаба онтологии. Показатель «Максимальное отношение ширины соседних уровней» (значение равно 16,5) в совокупности с другими, перечисленными ранее показателями ширины позволяет оценить сбалансированность подготовленной онтологии. Чем меньше это значение, тем равномернее расширение онтологии от уровня к уровню. Ожидаемый результат меньше или равен 13, так как онтология предметной области достаточно масштабна. Показатель «Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе» (значение равно 10,6) – это один из показателей, определяющих равномерность распределения вершин графа. При расчете учитывается количество подклассов у классов предпоследних уровней. Таким образом, разработанная онтология неравномерна (значение меньше или равное 8 более предпочтительно с точки зрения эргономики). Значение показателя «Среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину» (значение равно 1,72) характеризует восприятие онтологии при прочтении. Ожидаемый результат – сбалансированность длин ветвей дерева онтологии, значение меньше 1.

В дальнейшем авторы планируют провести дополнительный анализ полученных значений каждого критерия и адаптировать онтологию для системы логического вывода RDFox.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов О.Ю., Осипов Ю.М., Мецержаков Р.В. Активная карданная передача как элемент киберфизической системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 934–938.
2. Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения / А.В. Архипкин, В.И. Комченков, Д.Н. Корольков, В.Ф. Петров, С.Б. Симонов, А.И. Терентьев // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 45. – С. 116–129.
3. Исследование и разработка проектного облика мобильной робототехнической системы для проведения геологической разведки на поверхности Луны / А.В. Васильев, А.С. Кондратьев, А.А. Градовцев, И.Ю. Даляев // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 45. – С. 141–156.
4. Smirnov A., Kashevnik A., Ponomarev A. Multi-level self-organization in cyber-physical-social systems: smart home cleaning scenario // Procedia CIRP. – 2015. – Vol 30. – P. 329–334.
5. Context-based coalition creation in human-robot systems: approach and case study / A. Smirnov, A. Kashevnik, M. Petrov, V. Parfenov // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10459. – P. 229–238.
6. Petrov M., Kashevnik A. Ontology-based indirect interaction of mobile robots for joint task solving: a scenario for obstacle overcoming // 12th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". – 2017. – Vol. 113. – P. 1–6.
7. Калязина Д.М., Федорова А.Е. Обоснование выбора онтологического подхода для построения моделей СММ и СОБИТ // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 2. – С. 115.
8. Hloman H., Stacey D. Approaches, methods, metrics, measures, and subjectivity in ontology evaluation: a survey // Semantic Web Journal. – 2014. – P. 1–11. – URL: <http://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj657.pdf> (accessed: 14.06.2019).
9. Болотникова Е.С., Гаврилова Т.А., Горовой В.А. Об одном методе оценки онтологий // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 3. – С. 98–110.
10. Смахун Я.А. Онтологии в системах, основанных на знаниях: возможности их применения // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5 (47), ч. 3. – С. 173–175.
11. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. В 3 ч. Ч. 2: учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 487 с.
12. Городецкий В.И., Тушканова О.Н. Онтологии и персонификация профиля пользователя в рекомендующих системах третьего поколения // Онтология проектирования. – 2014. – № 3 (13). – С. 7–31.

13. *Vrandečić D.* Ontology evaluation: PhD theses [Electronic resource]. – Karlsruhe, 2010. – 235 p. – URL: http://simia.net/download/ontology_evaluation.pdf, (accessed: 14.06.2019).
14. Субъективные метрики оценки онтологий [Электронный ресурс] / Т.А. Гаврилова, В.А. Горовой, Е.С. Болотникова, В.В. Горелов // Знания–Онтологии–Теории (ЗОНТ-09): материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Новосибирск, 2009. – С. 178–186. – URL: math.nsc.ru/conference/zont09/reports/39Gavrilova-Gorovoi-Bolotnikov-Gorelov.pdf (accessed: 14.06.2019).
15. Графы и деревья [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/41/41/lecture/1237?page=3> (дата обращения: 14.06.2019).
16. Путь и цикл в графе [Электронный ресурс]. – URL: https://lms2.sseu.ru/courses/eresmat/course2/razd5_2/par5_3k2.htm (дата обращения: 14.06.2019).
17. Дискретная математика. Алгоритмы [Электронный ресурс]. – URL: <http://rain.ifmo.ru/cat/view.php/theory/graph-general/random-2005> (дата обращения: 14.06.2019).
18. *Боровиков В.* Statistica. Искусство анализа данных на компьютере. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.

Калязина Дарья Михайловна, аспирант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Основное направление научных исследований – онтологическое моделирование. Имеет 24 публикации. E-mail: darya.kalyazina@mail.ru

Кашевник Алексей Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. Основное направление научных исследований – управление знаниями, облачные среды, человеко-машинное взаимодействие, робототехника, профилирование, онтологии, интеллектуальные пространства. Имеет более 150 научных публикаций. E-mail: alexey@iias.spb.su

Darya Kalyazina, PhD student of ITMO University. The main research topic is ontology modeling. She is the author of 24 research papers. E-mail: darya.kalyazina@mail.ru

Alexey Kashevnik, PhD, senior researcher of SPIIRAS. The main research topics are knowledge management, cloud systems, human-computer interaction, robotics, user profiling, ontologies, and smart spaces. He is the author of more than 150 research papers. E-mail: alexey@iias.spb.su

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36

Development and evaluation of cyber-physical-social system ontology based on the analysis of typical scenarios for mobile robots interaction*

D.M. KALYAZINA^{1,a}, A.M. KASHEVNIK^{2,b}

¹ *ITMO University, 49, Kronverksky Prospekt, St. Petersburg, 197101, Russian Federation*

² *St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, 39, 14 Line, Russian Federation*

^a *darya.kalyazina@mail.ru* ^b *alexey@iias.spb.su*

Abstract

The paper describes typical scenarios for mobile robots utilization. Scenarios cover the main processes of robot interaction such as interaction of vacuum cleaners and robots while cleaning premises, interaction of two robots to collect an object from components, and finally interaction between the manipulating robot and the measuring robot aimed at region studying, overcoming obstacles, and carrying out manipulations. The main processes that occur in these

* *Received 26 October 2018.*

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

scenarios are interaction between robots and humans for joint tasks performing. The paper presents a detailed description of the ontology of socio-cyberphysical system based on the analysis of the above scenarios. The paper also discusses the rules of ontological evaluation. The existing methods of evaluation are described, with their division into classes depending on the means of ontological analysis. Evaluation of the developed ontology has been conducted on the basis of the graph topology study. The evaluation has confirmed that the developed ontology does not contain critical problems and generally satisfies the main evaluation indicators such as the number of different cycles in the graph, the number of vertices with multiple parents, the number of vertices in the graph, the ratio of the number of vertices with normal degree in relation to all vertices, and the average quadratic deviation of the degree of the top of the graph. However, a number of values of the main indicators exceed the expected values, for example, the maximum ratio of the width of the adjacent levels, the mean square deviation of the leaf children at the penultimate vertices in the graph, and the mean square deviation of the depth divided by the average depth. Therefore, further work on the ontology revision is expected. It is planned to analyze the criteria that do not meet the requirements and then to offer possible options for the improvement of the ontology. It is also necessary to review the editors and select a logical inference system for further research.

Keywords: socio-cyberphysical system, mobile robots, ontology, ontograph, ontology evaluation, ontology evaluation methods

REFERENCES

1. Osipov O.Yu., Osipov Yu.M., Mescheryakov R.V. Aktivnaya kardannaya peredacha kak element kiberfizicheskoi sistemy [Active driveline as an element of cyber-physical system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 11, pp. 934–938.
2. Arkhipkin A.V., Komchenkov V.I., Korolkov D.N., Petrov V.F., Simonov S.B., Terentev A.I. Zadachi gruppovogo upravleniya robotami v robototekhnicheskome komplekse pozharotusheniya [Problems of group control of robots in the robotic complex of fire extinguishing]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2016, iss. 45, pp. 116–129.
3. Vasiliev A.V., Kondratyev A.S., Gradovtsev A.A., Dalyaev I.Yu. Issledovanie i razrabotka proektnogo oblika mobil'noi robototekhnicheskoi sistemy dlya provedeniya geologicheskoi razvedki na poverkhnosti Luny [Research and development of design shape of a mobile robotic system for geological exploration on the Moon's surface]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2016, iss. 45, pp. 141–156.
4. Smirnov A., Kashevnik A., Ponomarev A. Multi-level self-organization in cyber-physical-social systems: smart home cleaning scenario. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 30, pp. 329–334.
5. Smirnov A., Kashevnik A., Petrov M., Parfenov V. Context-based coalition creation in human-robot systems: approach and case study. *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 10459, pp. 229–238.
6. Petrov M., Kashevnik A. Ontology-based indirect interaction of mobile robots for joint task solving: a scenario for obstacle overcoming. *12th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*, 2017, vol. 113, pp. 1–6.
7. Kalyazina D.M., Fedorova A.E. Obosnovanie vybora ontologicheskogo podkhoda dlya postroeniya modelei CMMI i COBIT [The substantiation of choice ontological approach for engineering models CMMI and COBIT]. *Mezhdunarodnyi studentcheskii nauchnyi vestnik – International Student Science Journal*, 2016, no. 2, p. 115.
8. Hloman H., Stacey D. Approaches, methods, metrics, measures, and subjectivity in ontology evaluation: a survey. *Semantic Web Journal*, 2014, pp. 1–11. Available at: <http://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj657.pdf> (accessed 14.06.2019).
9. Bolotnikova E.S., Gavrilova T.A., Gorovoy V.A. To a method of evaluating ontologies. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 3, pp. 448–461. Translated from *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2011, no. 3, pp. 98–110.
10. Smekhun Ya.A. Ontologii v sistemakh, osnovannykh na znaniyakh: vozmozhnosti ikh primeneniya [Ontologies in the knowledge based systems: possibilities of their application]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal – International Research Journal*, 2016, no 5 (47), pt. 3, pp. 173–175.

11. Orlov A.I. *Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie*. V 3 ch. Ch. 2 [Organizational and economic modeling. In 3 pt. Pt. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 487 p.
12. Gorodetsky V.I., Tushkanova O.N. Ontologii i personifikatsiya profilya pol'zovatelya v rekomenduyushchikh sistemakh tret'ego pokoleniya [Ontology-based user profile personification in 3G recommender systems]. *Ontologiya proektirovaniya – Ontology of Designing*, 2014, no. 3 (13), pp. 7–31.
13. Vrandeic D. *Ontology evaluation*: PhD theses. Karlsruhe, 2010. 235 p. Available at: http://simia.net/download/ontology_evaluation.pdf (accessed 14.06.2019).
14. Gavrilova T.A., Gorovoy V.A., Bolotnikova E.S., Gorelov V.V. [Subjective metrics of ontology assessment]. *Znaniya-Ontologii-Teorii (ZONT-09): materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Knowledge-Ontology-Theory: materials of the All-Russian conference with international participation], Novosibirsk, 2009, pp. 178–186. (In Russian). Available at: <http://math.nsc.ru/conference/zont09/reports/39Gavrilova-Gorovoi-Bolotnikov-Gorelov.pdf> (accessed 14.06.2019).
15. *Grafy i derev'ya* [Graphs and trees]. Available at: <http://www.intuit.ru/studies/courses/41/41/lecture/1237?page=3> (accessed 14.06.2019).
16. *Put' i tsikl v grafe* [Path and cycle in the graph]. Available at: https://lms2.sseu.ru/courses/eresmat/course2/razd5_2/par5_3k2.htm (accessed 14.06.2019).
17. *Diskretnaya matematika. Algoritmy* [Discrete mathematics. Algorithms]. Available at: <http://rain.ifmo.ru/cat/view.php/theory/graph-general/random-2005> (accessed 14.06.2019).
18. Borovikov V. *Statistika. Iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere* [Statistica. The art of analyzing data on a computer]. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnaya-model-nepreryvno-professionalno-orientirovannoy-podgotovki-spetsialistov-sotsialnoy-sfery-dlya-ugolovno.pdf> (accessed 14.06.2019).

Для цитирования:

Разработка и оценка онтологии социоконвергентной системы на основе анализа типовых сценариев использования мобильных роботов / Д.М. Калязина, А.М. Кашевник // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 21–36. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36.

For citation:

Kalyazina D.M., Kashevnik A.M. Razrabotka i otsenka ontologii sotsiokiberfizicheskoi sistemy na osnove analiza tipovykh stsenariy ispol'zovaniya mobil'nykh robotov [Cyber-physical-social system ontology development and evaluation based on the analysis of typical scenarios for mobile robots interaction]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 21–36. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.43

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-37-48

Обработка ошибок в синтаксическом анализаторе компилятора языка E1*

А.А. МАЛЯВКО

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

a.malyavko@corp.nstu.ru

Рассматривается задача обработки синтаксических ошибок в компиляторе функционально-императивного языка программирования E1, выполняемой с целью организации продолжения синтаксического разбора после останова для нахождения максимально возможного количества действительно допущенных ошибок. Предлагается комбинация нескольких известных способов нейтрализации синтаксических ошибок, ориентированная на особенности используемого в трансляторе алгоритма детерминированного синтаксического разбора. Парсер компилятора реализован в виде стекового автомата, управляемого входным токеном и символом, снимаемым с вершины стека. Предлагаемый метод нейтрализации ошибок основан на полном переборе всех возможных вариантов модификации одного ошибочного токена: поочередная вставка, замена и удаление для выбора такого варианта перезапуска автомата, при котором следующая синтаксическая ошибка обнаруживается на максимальном расстоянии от нейтрализуемой. Если никакая модификация одиночного ошибочного токена не приводит к успешной нейтрализации, то в предлагаемом методе после каждого удаления расширяется множество допустимых токенов, вычисляемое как объединение множеств выбора нескольких символов, находящихся на вершине стека автомата. Этот переход от обработки одиночной ошибки к обработке множественной позволяет уменьшить количество входных токенов, считываемых парсером без анализа, по сравнению с известным режимом паники. Описываемый алгоритм нейтрализации сочетается в E1-компиляторе с «правилами для типичных ошибок», включаемыми в грамматику для таких возможных ситуаций, когда для успешной нейтрализации ошибки требуется вставить не один, а два или три токена. Подобные ошибки возможны в программах на языке E1, их эффективная нейтрализация другими способами представляется весьма затруднительной.

Ключевые слова: формальная грамматика, порождающее правило, автомат, множество выбора, нисходящий разбор, одиночная ошибка, нейтрализация ошибок, компилятор

* Статья получена 10 января 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка транслятора для нового языка программирования [1], отличающегося от уже существующих языков рядом существенных свойств и характеристик, может быть связана с необходимостью поиска путей решения ранее неизвестных задач [2, 3] или, по меньшей мере, сочетания способов решения задач, ранее рассматривавшихся отдельно друг от друга. Некоторые из таких задач и пути их решения применительно к новому функционально-императивному языку программирования E1 были рассмотрены в [4].

С точки зрения программиста-пользователя существенной характеристикой компилятора является его способность обнаруживать и адекватно описывать все реально имеющиеся в его программе лексические, синтаксические и семантические ошибки. Другими словами, компилятор, останавливающийся после первой обнаруженной ошибки, имеет очень плохие потребительские качества. В хорошем компиляторе должна быть реализована эффективная стратегия нейтрализации ошибок. Лексические ошибки могут рассматриваться как синтаксические, поскольку никакое лексически неправильное слово не может являться правильной частью какой-либо синтаксической конструкции. Поэтому обработку лексических и синтаксических ошибок можно рассматривать совместно.

Применительно к семантическим ошибкам следует отметить, что далеко не все они могут быть обнаружены на этапе компиляции, некоторые проявляются только при выполнении скомпилированной программы (достаточно вспомнить известную ситуацию возможного деления на ноль).

В этой работе не рассматриваются семантические ошибки и проблемы их обработки. Предлагаются некоторые модификации известных стратегий нейтрализации синтаксических ошибок и описывается их реализация в трансляторе языка E1.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Синтаксический анализатор (парсер) транслятора функционально-императивного языка E1 представляет собой детерминированный стековый автомат с одним состоянием [5, 6], осуществляющий нисходящий разбор входного текста. Автомат парсера был построен пакетом автоматизации проектирования трансляторов «Вебтранслаб» [7] путем преобразования LL(1)-грамматики языка E1. Небольшой фрагмент этой грамматики (без встроенных в нее действий, расширяющих парсер и осуществляющих функции семантического анализа, оптимизации и генерации кода) выглядит так:

```

module : moduleName [ options ]? [ imports ]* [ initializers ]*
          [ functionDef ]+
moduleName : "module" ident [ "." ident ]* ";"
options : "options" "(" options ")" ";"
imports : "import" ident [ "(" "." | "," ident ]* ";"
initializers : [ tuple [ guard ]? ]? block
initializers : "record" ident "(" options ")" ";"
functionDef : [ access ]? ident argTuple bodyFunction
access : "public" | "private"

```

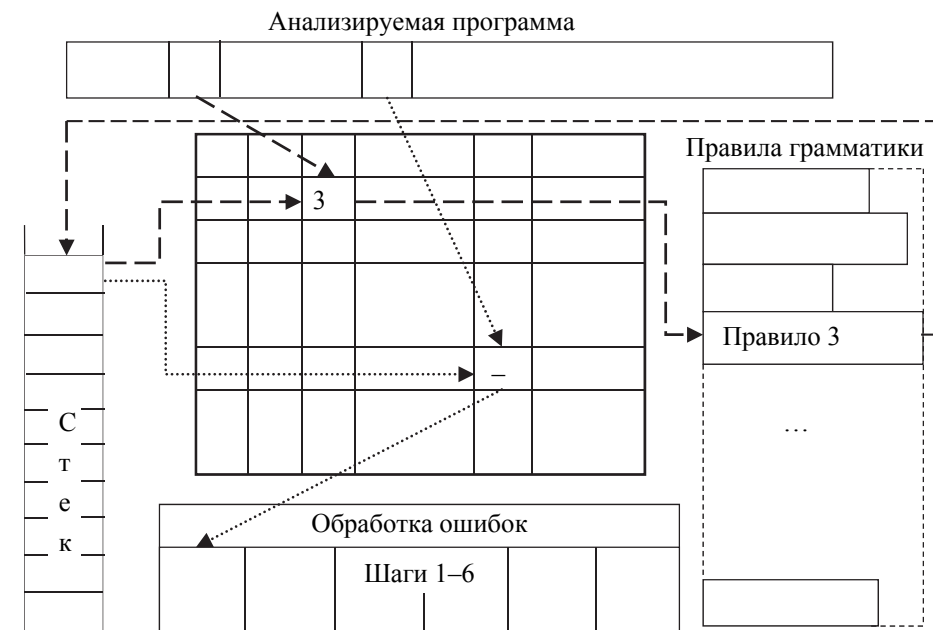
```

argTuple : "(" [ argTupleElem [ "," argTupleElem ]* ]? ")"
argTupleElem : varDef [ varType ]? ident
argTupleElem : varType ident
argTupleElem : expression
bodyFunction : guard block restBody
bodyFunction : block
restBody : bodyFunction
...

```

Полная грамматика языка E1 [8] содержит 342 порождающих правила (без специальных правил для типичных ошибок), в которых используются 112 терминалов (токенов) и 157 нетерминалов. Принадлежность грамматики к классу LL(1) позволяет реализовать на ее основе детерминированный нисходящий синтаксический разбор [3]. Для построения E1-компилятора эта грамматика была преобразована в стековый автомат, управляемый входным токеном и символом, снимаемым с верхушки стека [3, 5, 9].

Управляющая таблица автомата, полученная в результате этого преобразования, имеет размер 157 строк на 112 колонок и является сильно разреженной. В программе парсера эта таблица хранится в виде связанного списка строк, содержащих только непустые клетки. Структура автомата и его логические связи с обрабатываемой программой (сверху), стеком (слева), грамматикой (справа) и функционалом нейтрализации ошибок (снизу) показаны на рисунке.



Взаимные связи управляющей таблицы парсера, анализируемой программы, стека, правил грамматики и функционала нейтрализации ошибок

Interconnections of the parser control table, the program being analyzed, the, grammar rules stack, and error neutralization functional

Управляющая таблица в центре показана в обычном неразрезанном представлении. Каждая строка соответствует одному нетерминалу, который может находиться на вершущке стека автомата. Непустые клетки управляющей таблицы содержат порядковые номера порождающих правил, правые части которых должны быть занесены в стек автомата в порядке от последнего символа к первому. С каждой непустой клеткой сопоставлен терминал, принадлежащий множеству выбора [10, 11] того правила, порядковый номер которого находится в клетке.

Перед запуском парсера в его стек заносятся вначале терминал (токен) *EndOfFile*, а затем начальный нетерминал грамматики (в данном случае это нетерминал *module*). Из входного файла считывается первый токен (далее считанный, но еще не обработанный токен называется текущим). Автомат запускается, далее он работает циклически [12, 13].

В каждом повторении цикла работы автомат синтаксического анализатора снимает один верхний символ со стека и проверяет его тип.

Если это терминал, то он сравнивается с текущим токеном. При совпадении текущий токен заменяется следующим из входного файла и автомат переходит к следующему циклу. Несовпадение означает первичное обнаружение синтаксической ошибки и вызывает запуск процедуры нейтрализации ошибок. Перед входом в режим нейтрализации выполняется сохранение полного состояния автомата, в том числе содержимого его стека и позиции ошибочного токена во входном потоке.

Если символ, снятый с вершущки стека, является нетерминалом, то из управляющей таблицы автомата выбирается клетка, находящаяся на пересечении строки, соответствующей этому нетерминалу, и колонки, озаглавленной текущим токеном. Если клетка содержит число (номер правила), то правая часть этого правила посимвольно в обратном порядке (начиная с последнего символа) заносится в стек и автомат переходит к следующему циклу работы. На рисунке эта ситуация отображена стрелками крупного пунктира, связанными с клеткой таблицы, содержащей номер правила 3. Если же клетка пуста (нет правила для замены снятого со стека нетерминала при текущем входном токене), то это означает первичное обнаружение синтаксической ошибки. На рисунке эта ситуация отображена стрелками мелкого пунктира, связанными с пустой клеткой управляющей таблицы. Осуществляется запуск процедуры нейтрализации ошибок после полного сохранения состояния автомата, в том числе содержимого его стека и позиции ошибочного токена во входном потоке.

Обнаружение любой ошибки приводит к формированию подробного диагностического сообщения для автора программы и останову автомата до завершения выполнения процедуры нейтрализации.

Идея нейтрализации ошибок [14–16] основывается на понятии одиночной ошибки. Это означает, что программа, содержащая синтаксическую ошибку, может быть представлена как правильное начало – цепочка токенов φ , один ошибочный токен ε и, вероятно, правильное продолжение – цепочка ψ :

$$program : \varphi \varepsilon \psi$$

Таким образом, суть задачи нейтрализации состоит в том, чтобы определить такой способ модификации одного ошибочного токена, который позволяет после его нахождения перезапустить автомат для нормальной обработки правильного продолжения ψ – остатка обрабатываемой программы.

Нейтрализация предпринимается для того, чтобы предоставить программисту максимум информации о действительно допущенных в программе ошибках, но должна выполняться так, чтобы не формировать диагностических сообщений о несуществующих (называемых наведенными) ошибках.

2. ОБРАБОТКА ОШИБОК В E1-ТРАНСЛЯТОРЕ

Обычно под нейтрализацией [14–16] понимается попытка продолжения анализа программы после обнаружения любой синтаксической ошибки путем последовательного перебора следующих вариантов поиска «исправления» ошибки:

- удаление ошибочного токена;
- вставка перед ошибочным токеном некоторого другого токена;
- замена ошибочного токена некоторым другим токеном.

После каждой модификации ошибочного токена полностью восстанавливается состояние парсера, зафиксированное на момент обнаружения ошибки, в том числе содержимого стека автомата, и позиция текущего токена во входном потоке, и выполняется его перезапуск. Новый останов по ошибке на некотором заданном расстоянии от ошибочного токена воспринимается как неудача данной попытки нейтрализации ошибки. В этом случае выбирается следующий вариант модификации ошибочного токена и процедура перезапуска парсера повторяется.

В том случае, если после очередного перезапуска автомат заново не останавливается по ошибке на заданном расстоянии от точки первичного останова, ошибка считается нейтрализованной и парсер возвращается в обычный режим работы. Если же на очередном шаге оказались исчерпаны все возможные варианты модификации ошибочного токена, то ошибка квалифицируется как множественная (не одиночная). Парсер либо останавливает обработку транслируемой программы вообще, либо переходит в режим паники [17–19], ожидая появления на входе одного из так называемых реперных токенов. Такими токенами обычно считаются слова, завершающие целые синтаксические конструкции [20, 21].

При первом же входе в режим нейтрализации ошибок блокируются все процессы синтеза, вызываемые парсером в нормальном режиме работы: преобразование последовательности токенов в абстрактное синтаксическое дерево, далее – в псевдокод, его оптимизация и формирование объектного кода.

В трансляторе языка E1 с целью уменьшения количества неанализируемых токенов при переходе к режиму паники описанный механизм модифицирован следующим образом. Процедура нейтрализации синтаксических ошибок организована циклически. Изменена по сравнению с обычно описываемой в литературе очередность применения модификаций ошибочного токена. Вначале обрабатываются все допустимые вставки, затем все допустимые замены, после чего – удаление ошибочного токена. Цикл, включающий все вставки, все замены и одно удаление, повторяется до тех пор, пока не бу-

дет найден хотя бы один вариант успешной нейтрализации. В каждом повторении цикла реализуются следующие шаги.

Шаг 1, инициализация. Для выполнения всех попыток вставки и замены предварительно формируется множество всех допустимых токенов. Его составляет множество выбора символа, находящегося на верхушке стека автомата. Если этот символ – терминал, то только он и будет входить в множество допустимых токенов. Если же это нетерминал, то вычисляется объединение множеств выбора всех правил грамматики с этим нетерминалом в левой части. Только допустимые токены будут использоваться в попытках вставки/замены при выполнении шагов 2, 3 и 4 процедуры нейтрализации. Символ, для которого вычислено множество всех допустимых токенов, считается обработанной верхушкой стека (см. шаг 5).

Шаг 2, вставка. Перебираются все допустимые токены. Для каждого из них полностью восстанавливается стек автомата, очередной допустимый токен вставляется перед позицией ошибочного символа во входной поток (вставка), и парсер перезапускается. Если он останавливается вновь на первичном ошибочном токене или на токене, следующем за ним, то попытка считается неудачной. В противном случае попытка нейтрализации воспринимается как успешная и определяется расстояние в токенах до следующего останова по ошибке либо до исчерпания входного потока, т. е. считывания токена *EndOfFile*. В последнем случае (при достижении конца входного потока) процесс компиляции завершается, поскольку больше ошибок в обрабатываемой программе найдено быть не может. Поэтому нет смысла искать другие варианты нейтрализации первичной ошибки. Если же автомат остановился по обнаружению новой синтаксической ошибки, то запоминается тот вариант допустимого токена, для которого расстояние от первичной до следующей ошибки является наибольшим.

Шаг 3, замена. Аналогичным образом обрабатывается множество допустимых символов для реализации всех попыток замены. При каждой из них полностью восстанавливается стек автомата, допустимый токен вставляется вместо ошибочного во входной поток, и парсер перезапускается. Попытка считается неудачной, если автомат останавливается по ошибке на токене, следующем во входном потоке за первичным ошибочным. Иначе попытка считается успешной и, точно так же, как на шаге 2, фиксируется наиболее удачный вариант нейтрализации в случае последующего останова по ошибке либо работа компилятора завершается, если достигнут конец входного потока.

Шаг 4, удаление. Те же действия с теми же условиями оценки успешности попытки нейтрализации выполняются при удалении первичного ошибочного токена. После этого выполняется либо шаг 5, либо шаг 6 в зависимости от того, была ли успешной хотя бы одна из попыток вставки/замены/удаления.

Шаг 5, расширение. Если ни одна из выполненных на шагах 2–4 попыток нейтрализации первичной ошибки не удалась, то реализуется существенно модифицированный режим паники. Как известно, при переходе в этот режим из входного потока считываются и без анализа отбрасываются все токены, не совпадающие с одним из так называемых реперных символов. Такие символы выбираются разработчиком транслятора и в правильных программах обычно завершают такие синтаксические конструкции, как оператор

(символ «;») или блок операторов (символ «}»). После обнаружения одного из этих токенов во входном потоке анализируется стек автомата и с его вершины последовательно сбрасываются те символы, которые не являются эквивалентами конструкции, соответствующей считанному реперному символу. В отличие от такого способа в E1-компиляторе после каждого повторения шага 5 множество всех допустимых токенов, вычисленное на шаге 1, дополняется токенами, принадлежащими множеству выбора символа, находящегося в стеке под обработанной верхушкой. Обработанная верхушка расширяется на одну позицию вниз. После этого повторяется шаг 4 и, в зависимости от его успешности, либо шаг 5, либо шаг 6.

Шаг 6, завершение. Если в очередном цикле удалась хотя бы одна попытка вставки/замены/удаления, то парсер выводится из режима нейтрализации. Восстанавливается состояние стека автомата и позиция во входном потоке, сохраненная для наиболее успешной попытки, и автомат перезапускается. Если в процессе нейтрализации шаг 4 выполнялся несколько раз, то перед перезапуском автомата просматривается обработанная верхушка стека и с него сбрасываются все те символы, для которых первый из неудаленных входной токен не принадлежит множеству выбора. Для каждой следующей вновь обнаруженной синтаксической ошибки весь процесс нейтрализации повторяется (следует помнить, что достижение конца входного потока в любой попытке нейтрализации приводит к немедленному завершению работы транслятора).

Приведем пример ситуации, в которой предложенный и реализованный метод нейтрализации позволяет пропустить без анализа меньше входных токенов, чем известный режим паники. Пусть в C-подобном языке (в языке E1 синтаксис присваивания такой же) сильно искаженный оператор присваивания выглядит так:

$$a = b +)) c - d / e + * f ;$$

Ни вставки, ни замены, ни удаление одного символа не приведут к успешной нейтрализации ошибки, обнаруженной при чтении первой закрывающей круглой скобки. Вход в режим паники приведет к игнорированию всех входных токенов вплоть до «;». При этом не будет обнаружена вторая ошибка, допущенная в этом операторе (последовательность токенов «) f + g»), которая могла бы быть нейтрализована путем замены закрывающей скобки на открывающую.

Парсер E1-компилятора, удалив сначала первую, а затем вторую открывающую скобки, восстановит процесс распознавания арифметического выражения при чтении токена «с» и вновь остановится по ошибке, прочитав токен «*».

Описанная процедура нейтрализации синтаксических ошибок в компиляторе языка E1 сочетается с включением в грамматику «правил для типичных ошибок». Эти правила добавляются для выявления и обработки таких возможных ситуаций, когда для успешной нейтрализации ошибки требуется вставить в анализируемую программу (или заменить в ней) не один, а два или три токена. Подобные ошибки возможны в программах на языке E1, их эффективная обработка какими-либо другими способами представляется весьма затруднительной.

Примером подобной ошибки может являться появление одного или нескольких выражений *when* (или *of*) вне контекста управляющего оператора *by*. Любые одиночные модификации ошибочного токена *when* (или *of*) согласно вышеприведенному алгоритму нейтрализации в лучшем случае приведут к возникновению наведенных ошибок при обработке токена «:», следующего после выражения за ним, т. е. на расстоянии, большем единицы. Другими словами, описанная выше процедура нейтрализации будет завершаться успехом, но приводить к формированию диагностических сообщений о несуществующих ошибках.

Выходом из этой ситуации [22], используемым и в E1-компиляторе, стало включение в грамматику дополнительных правил, согласно которым появление выражений *when* и *of* вне контекста оператора *by* не вызывают запуска процедуры нейтрализации одиночных ошибок. Однако в эти правила в форме действий включены вызовы специально написанных методов класса «парсер», которые формируют сообщения об ошибке и блокируют процессы синтеза.

Пример правила для типичной ошибки в грамматике языка E1 выглядит так:

```
operator : "when" Expression ":" { typicalError( tError.whenOutsideBy ); }
```

В этом правиле в фигурных скобках записан вызов функции фиксации типичной ошибки, код которой задается значением элемента перечисления *tError.whenOutsideBy*. Функция *typicalError* вызывается в момент применения этого правила и выполняет все те действия, которые необходимо выполнить при обнаружении любой синтаксической ошибки: формирование диагностического сообщения, блокировка процессов синтеза результата компиляции и т. д. Однако процедура нейтрализации ошибок не запускается. Как следствие, не будут формироваться ненужные диагностические сообщения о наведенных ошибках.

Кроме приведенного примера с выражениями *when* и *of* вне контекста охватывающего их оператора *by* в грамматику языка E1 включены и другие «правила для типичных ошибок», уменьшающие возможность выдачи парсером сообщений о наведенных ошибках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и реализован в трансляторе языка E1 способ нейтрализации синтаксических ошибок, эффективно использующий особенности алгоритма детерминированного синтаксического разбора, реализованного в виде стекового автомата, который управляется входным токеном и символом с верхушки стека.

Для реализации этого способа в момент первичного обнаружения ошибки формируется множество допустимых токенов, использование которых для нейтрализации не приведет к немедленному останову парсера. Выполняется полный перебор всех возможных вариантов модификации одного ошибочного токена – поочередная вставка допустимых токенов перед ним, замена его на допустимый токен и удаление его – для выбора того варианта перезапуска

автомата, при котором следующая синтаксическая ошибка будет обнаружена на максимальном расстоянии от первичной. В том случае, если никакая модификация одиночного ошибочного токена не приводит к успешной нейтрализации, после каждого удаления расширяется множество допустимых токенов, вычисляемое как объединение множеств выбора нескольких символов, находящихся на вершине стека автомата. После этого повторяются попытки модификации текущего токена. Реализация такого алгоритма вместо переключения в режим паники позволяет уменьшить количество неанализируемых парсером токенов.

Описываемый алгоритм нейтрализации сочетается в El-компиляторе с «правилами для типичных ошибок», включаемыми в грамматику для обработки таких возможных ситуаций, когда для успешной нейтрализации ошибки требуется вставить в анализируемую программу (или заменить в ней) не один, а два или три токена. Появление подобных ошибок в принципе возможно в программах на языке El, их эффективная обработка другими способами представляется весьма затруднительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maliavko A.* Novel functional-imperative programming language El: a brief introduction // Proceedings of the 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, October 2018. – P. 1–7.
2. *Crespi-Reghizzi S.* Formal languages and compilation. – London: Springer, 2009. – 364 p.
3. *Compilers: principles, techniques, and tools / A. Aho, M. Lam, R. Sethi, J. Ullman.* – Reading: Addison-Wesley, 2006. – 795 p.
4. *Maliavko A., Zhurkin P., Nagornov N.* The functionally-imperative programming language El and its translator // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018). – Novosibirsk, 2018. – Vol. 1, pt. 4. – P. 469–476.
5. *Watson D.* A practical approach to compiler construction. – Springer, 2017. – 254 p.
6. *Carroll J., Long D.* Theory of finite automata with an introduction to formal languages. – New Jersey: Prentice Hall, 1989. – 447 p.
7. *Малявко А.А.* Использование веб-приложений и веб-технологий при разработке учебного программного обеспечения для изучения методов трансляции // Современное образование: технические университеты в модернизации экономики России: материалы Международной научно-методической конференции, 27–28 января 2011 года. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2011. – С. 45–47.
8. *Meduna A.* Formal languages and computation: models and their applications. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 315 p.
9. *Rosenkrantz D., Stearns R.* Properties of deterministic top down grammars // Information and Control. – 1970. – Vol. 17 (3). – P. 226–256.
10. *Waite W., Goos G.* Compiler construction. – Heidelberg: Springer, 2012.
11. *Dos Reis A.* Compiler construction using Java, JavaCC, and Yacc. – Hoboken: Wiley & Sons, 2012. – 664 p.
12. *Малявко А.А.* Формальные языки и компиляторы: учебное пособие для вузов. – М.: Юрайт, 2017. – 429 с.
13. *Kumar R.* Theory of automata, languages and computation. – Tata: McGraw-Hill, 2010.
14. *Medeiros S., Mascarenhas F.* Syntax error recovery in parsing expression grammars // Applied computing 2018: the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing. – New York, 2018.

15. Cooper K., Torczon L. Engineering a compiler. – San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003.
16. Wilhelm R., Seidl H., Hack S. Compiler design: syntactic and semantic analysis. – New York: Springer, 2013. – 216 p.
17. Parr T., Harwell S., Fisher K. Adaptive LL(*) parsing: the power of dynamic analysis // Proceedings of the 2014 ACM International Conference on Object Oriented Programming Systems Languages & Applications. – New York: ACM, 2014. – P. 579–598.
18. Chandak M., Khurana K. Compiler design. – Hyderabad, India: Universitet press, 2018. – 480 p.
19. Grune R., Jacobs C. Parsing techniques: a practical guide. – New York: Springer, 2007. – 585 p.
20. Plaisted D. Source-to-source translation and software engineering // JSEA Special Issue on Software Dependability. – 2013. – Vol. 6, N 4A.
21. Afroozeh A., Izmaylova A. Faster, practical GLL parsing // Compiler Construction: 24th International Conference. – Heidelberg: Springer, 2015. – P. 89–108.
22. Safonov V. Trustworthy compilers. – Hoboken: Wiley & Sons, 2010. – 317 p.

Малаявко Александр Антонович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники факультета автоматизации и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: языки программирования и теория трансляции, нейронные сети с элементами самообучения, параллельные вычисления. Имеет около 50 публикаций, в их числе одна монография и один учебник для вузов. E-mail: a.malyavko@corp.nstu.ru

Malyavko Alexander Antonovich, PhD (Eng.), associate professor, Department of Computer Engineering, Faculty of Automation and Computer Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on programming languages and translation theory, neural networks with elements of self-learning and parallel computations. He is the author of about 50 publications including 1 monograph and 1 textbook for universities. E-mail: a.malyavko@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-37-48

Errors handling in the parser for the El-language compiler *

A.A. MALYAVKO

*Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
a.malyavko@corp.nstu.ru*

Abstract

We consider the problem of processing syntax errors in the compiler of the functional-imperative programming language El aimed at continuing syntactic parsing after a stop to find the maximum possible number of actually made errors. A combination of several well-known methods of neutralizing syntax errors is proposed. It is focused on the features of the deterministic parsing algorithm used in the translator. The compiler parser is implemented in the form of a stack automaton controlled by an input token and a symbol taken from the top of the stack. The proposed error neutralization method is based on a complete enumeration of all possible options for modifying one erroneous token – its alternate insertion, replacement and deletion to select such an option for restarting the automat in which the following syntax error is detected

* Received 10 January 2019.

at the maximum distance from the initially detected error. If no modification of a single erroneous token leads to a successful neutralization, then in the proposed method, after each deletion of the input token, a set of valid tokens expands, calculated as an integration of multiple selection sets for symbols at the top of the automaton stack. This transition from processing a single error to processing a multiple error allows you to reduce the number of input tokens read by the parser without analysis as compared to the known panic mode. The proposed neutralization algorithm combines in the El-compiler with “rules for typical errors”, which are included in the grammar for such possible situations when, in order to successfully neutralize an error, you need to insert (or replace) not one, but two or three tokens.

Keywords: grammar, production rule, automat, selection sets, top-down parsing, single error, errors neutralization, compiler

REFERENCES

1. Maliavko A. Novel functional-imperative programming language El: a brief introduction. *Proceedings of the 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, October 2018, pp. 1–7.
2. Crespi-Reghizzi S. *Formal languages and compilation*. London, Springer, 2009. 364 p.
3. Aho A., Lam M., Sethi R., Ullman J. *Compilers: principles, techniques, and tools*. Reading, Addison-Wesley, 2006. 795 p.
4. Maliavko A., Zhurkin P., Nagornov N. The functionally-imperative programming language El and its translator. *14th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018)*, Novosibirsk, 2018, vol. 1, pt. 4, pp. 469–476.
5. Watson D. *A practical approach to compiler construction*. Springer, 2017. 254 p.
6. Carroll J., Long D. *Theory of finite automata with an introduction to formal languages*. New Jersey, Prentice Hall, 1989. 447 p.
7. Malyavko A.A. [Using web applications and web technologies in the development of educational software for studying methods of translation]. *Sovremennoe obrazovanie: tekhnicheskie universitety v modernizatsii ekonomiki Rossii: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii* [Modern education: technical universities in the modernization of the Russian economy: materials of the International Scientific and Methodological Conference]. Tomsk, TUSUR Publ., 2011, pp. 45–47. (In Russian).
8. Meduna A. *Formal languages and computation: models and their applications*. Boca Raton, CRC Press, 2014. 315 p.
9. Rosenkrantz D., Stearns R. Properties of deterministic top down grammars. *Information and Control*, 1970, vol. 17 (3), pp. 226–256.
10. Waite W., Goos G. *Compiler construction*. Heidelberg, Springer, 2012.
11. Dos Reis A. *Compiler construction using Java, JavaCC, and Yacc*. Hoboken, Wiley & Sons, 2012. 664 p.
12. Maliavko A. *Formal'nye yazyki i kompilyatory* [Formal languages and compilers]. Moscow, Yurait Publ., 2017. 429 p.
13. Kumar R. *Theory of automata, languages and computation*. Tata, McGraw-Hill, 2010.
14. Medeiros S. Mascarenhas F. Syntax error recovery in parsing expression grammars. *Applied computing 2018: the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing*. New York, 2018.
15. Cooper K., Torczon L. *Engineering a compiler*. San Francisco, Morgan Kaufmann, 2003.
16. Wilhelm R., Seidl H., Hack S. *Compiler design: syntactic and semantic analysis*. New York, Springer, 2013. 216 p.
17. Parr T., Harwell S., Fisher K. Adaptive LL(*) parsing: the power of dynamic analysis. *Proceedings of the 2014 ACM International Conference on Object Oriented Programming Systems Languages & Applications*. New York, ACM, 2014, pp. 579–598.

18. Chandak M., Khurana K. *Compiler design*. Hyderabad, India, Universitet press, 2018. 480 p.
19. Grune R., Jacobs C. *Parsing techniques: a practical guide*. New York, Springer, 2007. 585 p.
20. Plaisted D. Source-to-source translation and software engineering. *JSEA Special Issue on Software Dependability*, 2013, vol. 6, no. 4A.
21. Afroozeh A., Izmaylova A. Faster, practical GLL parsing. *Compiler Construction: 24th International Conference*. Heidelberg, Springer, 2015, pp. 89–108.
22. Safonov V. *Trustworthy compilers*. Hoboken, Wiley & Sons, 2010. 317 p.

Для цитирования:

Малявко А.А. Обработка ошибок в синтаксическом анализаторе компилятора языка El / А.А. Малявко // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 37–48. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-37-48.

For citation:

Maliavko A.A. Obrabotka oshibok v sintaksicheskom analizatore kompilyatora yazyka El [Errors handling in the parser of the El-language compiler]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 37–48. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-37-48.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 005.95

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-49-68

Формирование группы исполнителей для совместного решения задач: основанный на компетенциях метод и его реализация^{*}

М.В. ПЕТРОВ

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

197101, РФ, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

mikhail.petrov@iiias.spb.su

Управление проектами в крупных организациях и предприятиях представляет собой сложный трудоемкий процесс. Автоматический поиск экспертов и назначение их в качестве исполнителей на проекты, в которых они будут максимально полезны, увеличивает эффективность управления персоналом и уменьшает количество ошибок в этой области по сравнению с ручным назначением. Метод формирования группы исполнителей для совместного выполнения задач, представленный в настоящей статье, реализует этот процесс. При поиске и сопоставлении экспертов предложенным методом учитываются различные параметры, такие как компетентность экспертов, стоимость работы и степень психологического влияния друг на друга. Для этого в методе используется показатель оптимальности группы, зависящий от этих параметров. Все варианты экспертных групп, сформированные методом, отображаются в виде списка, отсортированного по коэффициенту оптимальности группы. Каждый из предоставляемых вариантов полностью удовлетворяет заданным требованиям, при этом система предоставляет возможность сравнить их по коэффициенту оптимальности группы и суммарной стоимости работы для выбора наиболее подходящего из вариантов. В статье описаны результаты реализации этого метода, его внедрения в систему управления компетенциями и тестирования. Показана работоспособность и эффективность метода на реальных данных, а также возможность применения описанного метода для больших объемов данных с сохранением высокой скорости выполнения. В дальнейшем планируется расширение набора критериев, используемых при формировании групп исполнителей, для нахождения наиболее подходящих для организации вариантов.

^{*} *Статья получена 05 февраля 2019 г.*

Результаты исследований являются частью проектов № 18-37-00377 и 16-29-12866, финансируемых Российским фондом фундаментальных исследований, а также бюджетной темой № 0073-2019-0005.

Ключевые слова: совместное решение задач, экспертные сети, системы управления компетенциями, экспертные группы, реализация метода, управление проектами, поиск экспертов, автоматизация управления персоналом

ВВЕДЕНИЕ

На всех предприятиях, в учреждениях и организациях есть специалисты, обладающие знаниями или профессиональными навыками в определенных областях [1]. Они выполняют большую часть работы, поэтому задача менеджеров по персоналу – правильно назначить экспертов для каждой задачи. Ручное назначение может быть неэффективным, поскольку требует много времени, а человеческий фактор может вызвать ошибки. Назначение экспертов становится более сложным, когда задачи требуют участия многих экспертов, имеющих опыт в различных областях. Целью поиска экспертов является выявление и ранжирование людей, обладающих знаниями в определенных областях, по некоторому запросу [2]. Таким образом, автоматический поиск экспертов может сделать этот процесс более эффективным и сократить количество неправильных назначений.

Совместная работа компетентных работников в качестве членов команды является ключом к успеху в предпринимательской деятельности. Традиционные методологии управления человеческими ресурсами подразумевают определение необходимых навыков для членов команды и оценки этих навыков среди сотрудников. Однако на практике трудно определять навыки работников на систематической основе [3]. Основной проблемой в любой организации является управление компетенциями формальных или неформальных групп людей внутри организации и выявление экспертных групп, компетентных в определенной области. Этот процесс отличается от определения группы, к которой относится определенный эксперт [4]. С другой стороны, для реализации интеллектуального назначения экспертов требуется профилирование уровней знаний каждого члена организации [5]. Планирование человеческих ресурсов может помочь в распределении специалистов по бизнесу и управлении профессиональными возможностями персонала [6].

Предложенный в статье метод направлен на решение этой проблемы. Он формирует группу исполнителей, состоящую из экспертов, которые могут совместно выполнить определенную задачу. В отличие от классической задачи распределения ресурсов и методов, направленных на ее решение, данный метод формирует несколько альтернативных решений, удовлетворяющих требованиям, а также учитывает: требования к задаче, которую необходимо выполнить; навыки экспертов и их профессиональные уровни владения для каждой специализированной области; время, которое эксперт может потратить на выполнение задания; стоимость работы каждого эксперта; степень психологического влияния специалистов друг на друга. Кроме того, специфика проблемы, решаемой этим методом, состоит в уникальности ресурсов, т. е. экспертов. Метод основан на онтологическом компетентном представлении участников экспертной сети [7].

Метод реализован в рамках системы управления компетенциями, разработанной ранее [8, 9]. Для оценки метода использовалась информация о реальных специалистах и задачах, содержащаяся в системе, а также сгене-

рированная информация об экспертах и требованиях задачи. Внедренный метод сформировал разные группы исполнителей для каждой из задач. Статья дополняет работу автора [10] в области разработки и реализации метода.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ РАБОТ

В статье [11] предложен подход к формализации процесса формирования экспертных групп, основанный на применении таких математических и логических методов, как комбинаторика, метрические алгоритмы классификации, логика предикатов. Данный подход подразумевает наличие или составление пула экспертов, из которого формируется группа экспертов для проведения исследования, затрагивающего определенные области. Эксперты в такую группу выбираются путем сравнения поискового образа эксперта, представляющего собой набор значений, характеризующих уровень компетентности эксперта в каждой области знаний, с профилем исследования, содержащим информацию о требуемых компетенциях. Группы, сформированные из экспертов, в совокупности компетентных во всех необходимых областях знаний, сортируются по суммарному количеству областей знаний (в том числе повторяющихся), в которых компетентны члены группы и которые требуются для данной экспертизы.

Этот подход позволяет формировать экспертные группы, подходящие для требуемых экспертиз, и имеет ряд настраиваемых параметров. Одним из них является допустимый уровень компетентности отбираемых экспертов для каждой области знаний, позволяющий расширить и/или сузить диапазон, в рамках которого должен находиться уровень компетентности эксперта, для того чтобы его можно было включить в экспертную группу. Тем не менее подход не учитывает различия в уровнях компетентности экспертов при ранжировании экспертных групп.

В статье [12] представлено комплексное исследование современных подходов в области подбора экспертов и моделирования экспертизы. Авторы рассмотрели такие способы моделирования базы данных экспертов и поиска экспертов, как метабазы данных для хранения информации об экспертизах сотрудников, а также персональные профили экспертов как расширения таких баз; автоматическое обнаружение актуальной информации об экспертизе из вторичных источников; реферальная сеть, состоящая из групп людей с общими интересами или профессиями; генерирующие вероятностные модели, модели голосования, модели, основанные на графах, и их гибриды. Статья описывает основные принципы этих подходов, их слабые и сильные стороны. Однако авторы отмечают, что проблема нахождения группы экспертов для решения задач, затрагивающих различные области, изучена слабо и является актуальной проблемой для многих приложений.

Статья [13] затрагивает вопрос управления работой в области техподдержки и предлагает модель сети взаимодействия экспертов и соответствующий алгоритм рекомендации экспертов для автоматизированного назначения компетентного эксперта. В предлагаемой модели эксперты представлены в виде экспертного и социального профилей. Экспертный профиль

представляет профессиональные знания эксперта и содержит информацию об одной или нескольких специализированных областях и профессиональный уровень компетенции эксперта в каждой из этих областей. Социальный профиль представляет социальные знания эксперта и описывает эффективность его взаимодействия с другими экспертами. Предлагаемый авторами работы [13] алгоритм рекомендации экспертов представляет собой процесс поиска эксперта, состоящий из двух стадий. На первой стадии назначается исходный эксперт, чей профессиональный уровень не ниже, чем уровень сложности задачи. В зависимости от выбранной политики может быть выбран исходный эксперт с минимальными или максимальными профессиональными способностями, либо этот эксперт может быть выбран случайным образом. Если исходный эксперт не справляется с задачей, наступает вторая стадия. В этом случае алгоритм находит лучшего эксперта среди участников сети, связанных с исходным экспертом. Этот процесс продолжается, пока задача не решена или количество рекомендованных экспертов не превышает максимальное количество. В случае, если алгоритм рекомендации не находит экспертов, способных справиться с задачей, применяется ручной поиск.

Описанная модель эффективна для поиска экспертов с учетом их профессиональных и социальных знаний. Авторы продемонстрировали, что сочетание предложенных модели и алгоритма позволяет избежать ручного назначения экспертов и обеспечивает большую точность. Однако описанный алгоритм не может быть применен в случаях, когда задача затрагивает различные специализированные области, так как одной задаче назначается только один эксперт.

Авторы статьи [14] разрабатывают модель увеличения эффективности обучения для оптимизации планирования человеческих ресурсов в высокотехнологичных областях. Предлагаемая модель определяет оптимальное количество квалифицированных работников, которых следует назначить обучать других работников. Модель учитывает количество и стоимость работников всех уровней знания и сложность обучения работников первого и второго уровней, представленные в виде переменных и коэффициентов. Эта модель должна максимизировать эффективность и минимизировать стоимость рабочих. Модель находит несколько решений для всех заданных состояний (временных отрезков), используя вероятности переходов работников между состояниями, что обеспечивает гибкость модели.

В статье [15] описываются два генетических алгоритма, использующих нечеткие значения, которые решают проблему составления плана работ для оборудования, требующего гибкого обслуживания с учетом ограничений по компетенциям и доступности человеческих ресурсов. Данная задача может быть рассмотрена как частный случай поиска исполнителей для задачи управления устройством. Первый алгоритм основан на последовательной стратегии. Он генерирует интегрированные графики производства и технического обслуживания и затем назначает человеческие ресурсы для управления деятельностью. Второй алгоритм основан на стратегии общего составления плана и включает в себя генерацию интегрированных графиков производства и технического обслуживания, которые полностью удовлетворяют ограничениям по человеческим ресурсам.

Для каждой задачи, которая должна быть выполнена на машине, задано время выполнения для каждого уровня компетенций. Главной целью обоих алгоритмов является нахождение операционной последовательности заданного набора работ, минимизирующей цель и выраженной суммарной задержкой.

Авторы статьи [16] используют метод обратной оптимизации для решения проблемы распределения людских ресурсов с целью принятия во внимание недостатков и требований к компетенциям. Для этой цели авторы разработали систему индикаторов компетенций, создали модель идентификации структуры недостатков и применили обратную оптимизацию человеческих ресурсов, заключающуюся в нахождении решения, при котором стоимость будет минимальной. Система индикаторов компетенций содержит значения и коэффициенты психологических, поведенческих индикаторов работников, а также индикаторов навыков и знаний. Модель идентификации структуры недостатков содержит три уровня компетенций. На нижнем уровне представлены индикаторы из системы индикаторов компетенций. Значения верхнего и среднего уровней высчитываются на основе этих индикаторов и векторов оценочных весов. Обратная оптимизация должна создать план распределения рабочих часов каждого вида человеческих ресурсов для каждого типа работ таким образом, чтобы стоимость была минимальной. Для каждого типа работ заданы ограничивающие параметры в виде общего количества рабочих часов.

В статье [17] представлена задача определения навыков и знаний экспертов и отслеживания их изменений с течением времени. Для этого авторы предлагают концепцию иерархического профиля экспертизы, в рамках которого знания экспертов в тематических областях организованы в виде таксономии. Периодически система сохраняет состояние профиля для каждого эксперта, фиксирующего его навыки в текущий момент времени. Кроме того, авторы разрабатывают методы для выявления изменений в области деятельности эксперта.

Для выявления основных принципов, которые должен учитывать метод формирования группы исполнителей для совместного решения задач, описанные выше работы были проанализированы на предмет общих особенностей подходов, использованных при решении схожих задач. Результаты анализа представлены в таблице.

Сравнение особенностей рассмотренных подходов

Comparison of the considered approaches features

Особенность	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]
Предварительный отбор экспертов	✓			✓			
Профили экспертов	✓	✓	✓				✓
Профили задач	✓		✓		✓		
Ограничение минимального профессионального уровня экспертов	✓		✓	✓	✓	✓	

Окончание таблицы

End table

Особенность	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]
Ограничение максимального профессионального уровня экспертов	✓						
Итеративное нахождение решения	✓		✓		✓	✓	
Сортировка групп по суммарной компетентности	✓						
Вывод нескольких решений	✓			✓			
Сеть взаимодействия экспертов		✓	✓				
Учет стоимости экспертов				✓		✓	
Динамическое изменение профессионального уровня экспертов				✓		✓	✓
Учет времени выполнения работы экспертами					✓	✓	

Из анализа работ видно, что основные характерные особенности методов поиска исполнителей – ограничение минимального профессионального уровня экспертов и итеративное нахождение решения. Эти принципы необходимы для формирования группы, способной наиболее эффективно справиться с задачей. Также целесообразно использовать профили экспертов и задач для формализации требований задач и компетенций исполнителей. В зависимости от конкретного применения метод может учитывать принципы предварительного отбора экспертов, вывода нескольких решений, использования сети взаимодействия экспертов, учета стоимости экспертов, изменения их профессионального уровня, а также время выполнения ими работы. Таким образом, целесообразным является разработка метода, позволяющего итеративно находить компетентных экспертов, удовлетворяющих требованиям стоимости и времени выполнения задачи, который, в отличие от рассмотренных методов, будет формировать несколько вариантов групп экспертов и позволять сравнивать их между собой на основе объективного критерия.

2. ОСНОВАННЫЙ НА КОМПЕТЕНЦИЯХ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ГРУППЫ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ СОВМЕСТНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Разрабатываемый метод направлен на формирование группы исполнителей для совместного решения задач. Задача должна содержать набор требований к компетенциям исполнителей для выполнения определенных работ. Выходные данные метода должны включать в себя список вариантов групп

экспертов, покрывающих все требования задачи. Требование считается покрытым, если в группе есть хотя бы один эксперт, владеющий компетенцией, соответствующей этому требованию. Предлагаемый метод описывается концептуальной и математической моделями, а также алгоритмом. Их подробное описание представлено далее.

2.1. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЕРТНОЙ СЕТИ

На основе анализа существующих методов формирования групп объектов была разработана представленная на рис. 1 концептуальная модель экспертной сети, в рамках которой должен разрабатываться метод формирования группы исполнителей для совместного решения задач. Основными сущностями данной концептуальной модели являются следующие: эксперт, компетенция, задача, группа экспертов и метод формирования группы.

Экспертом может быть как человек, компетентный в какой-либо области, так и организация, выполняющая какие-либо работы и на определенном уровне владеющая компетенциями для выполнения этой работы. Информация о компетентности экспертов хранится в профилях экспертов. Контекст эксперта описывает дополнительную информацию об экспертах, не связанную с их компетенциями.

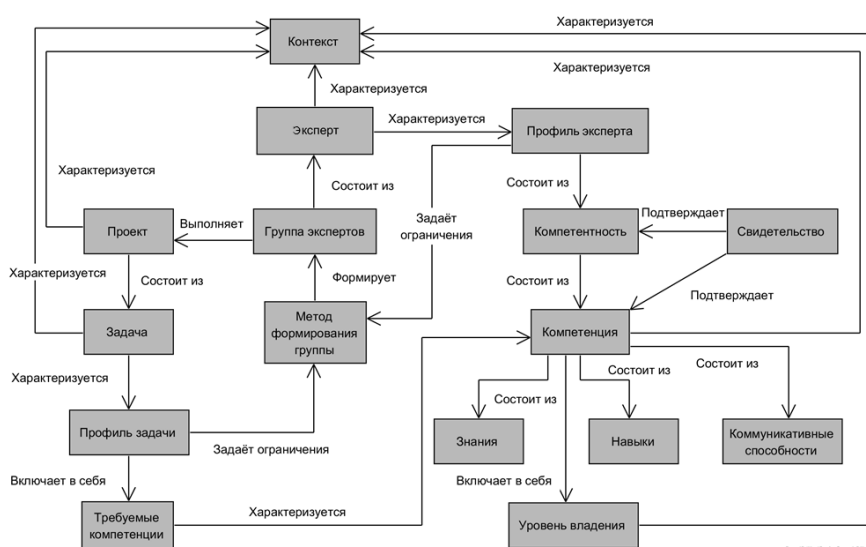


Рис. 1. Концептуальная модель экспертной сети для метода формирования группы

Fig. 1. Conceptual expert network model for the group formation method

Компетенция состоит из знаний, навыков и коммуникативных способностей эксперта и характеризуется уровнем профессионального владения каким-либо видом деятельности. При этом компетенциями можно владеть на разном уровне. Информация о каждой компетенции в целом и обо всех возможных уровнях владения ею характеризуется контекстом.

Весь набор компетенций, которыми владеет эксперт в совокупности с уровнями владения, определяется компетентностью эксперта. Предусматривается возможность подтверждения свидетельством как отдельных компе-

тенций, так и компетентности в целом. Информация о требованиях задач, которые необходимо выполнить, хранится в профилях задач. Каждая задача содержит набор компетенций, необходимых для ее решения, и требуемый уровень владения каждой из них. Таким образом, чтобы выполнить задачу, необходима группа экспертов, которые суммарно обладают всеми требуемыми компетенциями. Контекст задачи описывает дополнительную информацию о задачах, не связанную с их требованиями.

Для формирования группы экспертов предложенный метод использует в качестве ограничений информацию, содержащуюся в профилях задач и в профилях экспертов. Эта информация включает в себя компетенции, требуемые для выполнения задач в проекте, и компетентности экспертов. Группа экспертов формируется таким образом, чтобы каждый член группы владел как минимум одной компетенцией, необходимой для выполнения одной или нескольких задач, при этом его уровень владения этой компетенцией должен быть не ниже, чем уровень владения, указанный в задаче, и соответствовать уровню владения остальных членов группы. При этом каждой компетенцией, требуемой для выполнения задачи, должен обладать хотя бы один эксперт в группе.

2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТОДА

Для формализации и учета требований, предъявляемых к методу формирования группы исполнителей для совместного решения задач, была разработана математическая модель метода. Список навыков, которыми могут владеть эксперты, представляет собой множество

$$S = \{S_n, n = 1..N\}, \quad (1)$$

где N – количество навыков. При этом каждому навыку S_n соответствует максимальный уровень владения SM_n . Задача, которую необходимо решить, формально задается следующим образом:

$$T = \{t, \tau, C_{\max}\}, \quad (2)$$

где t представляет собой следующее множество:

$$t = \{t_n, n = 1..N\}, \quad (3)$$

в котором t_n – необходимый уровень владения навыком S_n ; τ представляет собой множество

$$\tau = \{\tau_n, n = 1..N\}, \quad (4)$$

где τ_n – время работы, которое должен потратить эксперт, владеющий навыком S_n , для решения задачи, связанной с этим навыком; C_{\max} – максимальная стоимость работ для выполнения задачи.

Список доступных экспертов представляет собой множество

$$P = \{P_m, m = 1..M\}, \quad (5)$$

где M – количество экспертов. При этом экспертам задаются следующие характеристики. Компетенции экспертов представляются следующим образом:

$$L = \begin{pmatrix} l_{11} \cdots l_{1N} \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ l_{M1} \cdots l_{MN} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где l_{MN} – уровень владения навыком S_n экспертом P_m . Стоимость работы экспертов представлена матрицей

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} \cdots c_{1N} \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ c_{M1} \cdots c_{MN} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где c_{MN} – цена применения навыка S_n экспертом P_m за час работы. Психологическая совместимость экспертов представлена в виде матрицы

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} \cdots r_{1N} \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ r_{M1} \cdots r_{MN} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где r_{ij} – степень влияния эксперта r_i на эксперта r_j , (изменяется от 0,1 до 10). Если один эксперт не оказывает никакого влияния на другого (ни положительного, ни отрицательного), то его степень влияния равна единице. Если влияние отрицательное, то степень влияния меньше единицы (например, если $r_{12}=0,5$, то первый эксперт ухудшает производительность второго в два раза), если влияние положительное, то степень больше единицы (если $r_{12}=2$, то первый эксперт улучшает производительность второго в два раза).

Сформированные группы представляются в виде бинарной матрицы

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} \cdots d_{1N} \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ d_{M1} \cdots d_{MN} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Строчки представляют собой решения, столбцы – доступных экспертов. Значение ячейки d_{fm} на пересечении обозначает, участвует ли эксперт P_m в решении d_f .

Критерий оптимальности группы экспертов рассчитывается на основе стоимости работы группы экспертов, совокупной компетентности исполнителей и совместимости исполнителей в группе.

Стоимость работы группы экспертов рассчитывается по формуле

$$Cost = \sum_{i \in K} \sum_{j \in N} x_{ij} c_{ij} \tau_j, \quad (10)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, l_{ij} \geq \max_{j \in N}(l_j) \text{ и } t_j > 0, \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \quad (11)$$

где K – количество исполнителей в группе.

Таким образом, если эксперт владеет требуемым для выполнения задачи навыком лучше остальных экспертов в группе (т. е. его уровень владения этим навыком не ниже, чем максимальный уровень владения им среди всех экспертов в группе), то цена применения этого навыка этим экспертом умножается на требуемое для данного навыка время работы и прибавляется к общей сумме.

Совокупная компетентность экспертов рассчитывается по формуле

$$Levels = \sum_{i \in K} \sum_{j \in N} x_{ij} \frac{l_{ij}}{t_j}. \quad (12)$$

Таким образом, если эксперт владеет требуемым для выполнения задачи навыком лучше остальных экспертов в группе, его уровень владения этим навыком делится на требуемый по задаче уровень владения и прибавляется к общей сумме. Совместимость экспертов при работе в группе рассчитывается по формуле

$$Reconcilability = \prod_{i \in K} \prod_{j \in K} r_{ij}. \quad (13)$$

Таким образом, степени влияния экспертов в группе перемножаются между собой. В итоге результат отображает, как состав группы в целом влияет на ее производительность. Оптимальность группы экспертов рассчитывается по формуле

$$O = \frac{Levels \times Reconcilability}{Cost}. \quad (14)$$

Таким образом, оптимальность группы экспертов прямо пропорциональна совокупной компетентности и совместимости экспертов при работе в группе и обратно пропорциональна стоимости работы группы экспертов.

Помимо коэффициента оптимальности группы экспертов, для каждого найденного решения рассчитывается время, необходимое для выполнения задачи сформированной группой. Это время рассчитывается по следующей формуле:

$$Time = \sum_{i \in K} \sum_{j \in N} x_{ij} \tau_j. \quad (15)$$

Таким образом, если эксперт владеет требуемым для выполнения задачи навыком лучше остальных экспертов в группе, то время работы, которое он тратит для решения задачи, связанной с этим навыком, прибавляется к общей сумме.

2.3. ПРЕДЛОЖЕННЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ГРУППЫ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Блок-схема алгоритма формирования группы исполнителей для совместного решения задач представлена на рис. 2. На первом шаге создается список решений, в котором будут храниться все сформированные группы исполнителей. Для формирования группы задействуются те эксперты, которые владеют на необходимом уровне хотя бы одним навыком, требуемым текущей задачей. Если хотя бы один из таких навыков еще не покрыт текущей группой, то эксперт добавляется в группу и исключается из списка рассматриваемых экспертов для исключения возможности повторного добавления.

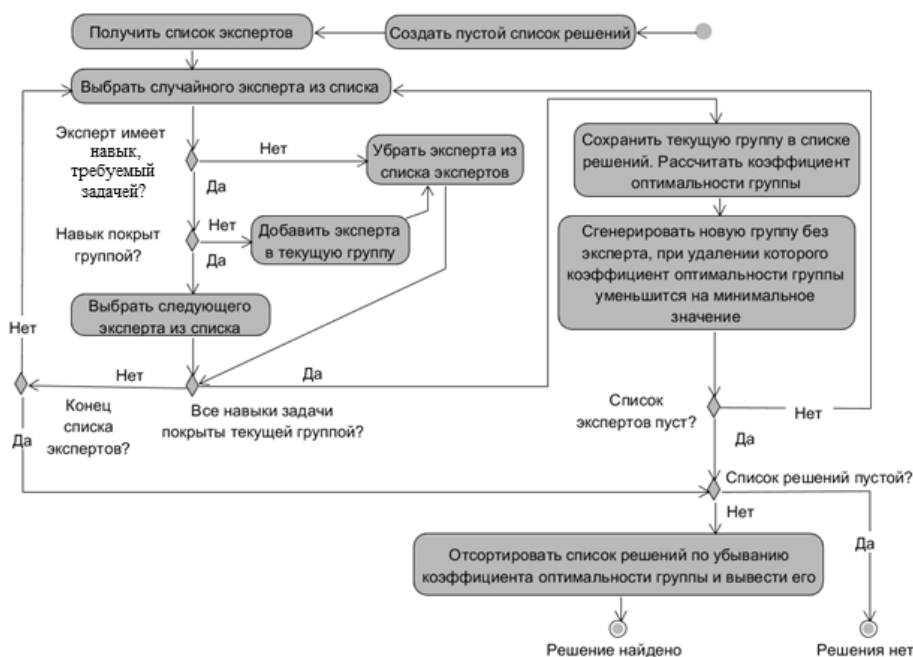


Рис. 2. Блок-схема алгоритма формирования группы исполнителей для совместного решения задач

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for the formation of a group of performers for the joint solution of problems

Если каждым навыком, необходимым для выполнения задачи, на необходимом уровне владеет хотя бы один эксперт из сформированной группы, считается, что такая группа удовлетворяет критериям задачи. Этот вариант сохраняется в списке решений, и для него производится расчет коэффициента оптимальности группы по формуле (14). Этот коэффициент используется для сравнения различных вариантов групп между собой. Затем производится изменение группы. Для каждого эксперта в группе производится расчет коэффициента оптимальности группы без этого эксперта. Эксперт, без которого коэффициент оптимальности группы будет максимальным, считается наименее эффективным и удаляется из группы. После этого снова производится добавление новых экспертов в группу (при необходимости). Когда доступных

для добавления в группу экспертов не остается, все сохраненные решения сортируются по уменьшению коэффициента оптимальности группы. Если при этом решений не было найдено, задача считается неразрешимой на данных условиях.

2.4. СЛОЖНОСТЬ АЛГОРИТМА

Для оценки сложности алгоритма необходимо рассмотреть худший возможный сценарий поиска:

- в задаче требуется владение всеми навыками;
- эксперты отсортированы таким образом, что при добавлении первого эксперта в группу необходимо проверить всех остальных экспертов для формирования полной группы;
- после каждого удаления наименее эффективного эксперта из группы только последний эксперт может быть добавлен в группу.

В таком случае после каждого добавления эксперта в группу и удаления из неё необходимо проверить всех оставшихся экспертов. Сложность этой процедуры равна M^2 . При удалении эксперта из группы требуется рассчитать оптимальность группы. Сложность этого расчета равна N , так как в рассматриваемом случае в группе всего один или два эксперта. Проверка всех экспертов также зависит от N . Таким образом, итоговая сложность алгоритма равна $O(M^2 \times N)$.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА

Описанный выше алгоритм формирования группы исполнителей для совместного решения задач был реализован и протестирован в рамках системы управления компетенциями Технопарка Университета ИТМО. Описание этой системы, особенности реализации метода, подробности и результаты его тестирования и оценки представлены далее.

3.1. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЯМИ

Для реализации предложенного алгоритма на основе описанных моделей была разработана система управления компетенциями в экспертной сети. Система реализована с использованием web-технологий, а также языков и фреймворков JavaSpring, HTML, Javascript.

Участники экспертной сети представлены в системе в виде резидентов. В качестве резидента может выступать как компания или организация, так и человек, предоставляющий какие-либо услуги. Информация о резиденте, его компетенциях и подтверждение этих компетенций содержится в профиле резидента.

Информация о резиденте включает в себя название организации или ФИО эксперта, web-сайт, короткое описание и контактную информацию. Компетенции представляют собой набор навыков в определенных областях, а также профессиональный уровень владения ими. В качестве подтверждения уровня владения может быть представлен сертификат либо опыт работы в

данной области. Набор компетенций определяет компетентность, которая также может быть подтверждена.

Проекты, которые выполняют участники экспертной сети, представлены в системе в виде задач. Информация о задаче и ее требованиях содержится в профиле задачи. Информация о задаче включает в себя название проекта и короткое описание работ, которые необходимо сделать. Требования представляют собой набор компетенций, которыми должны обладать исполнители проекта, а также профессиональный уровень владения ими.

Компетенции резидентов и требования задач включают в себя навыки в каких-либо областях знаний, которые представлены в системе в виде дерева навыков. Каждое умение включает в себя небольшое описание и несколько уровней владения. Каждый из этих уровней показывает, какими навыками необходимо обладать, чтобы владеть данным навыком на этом уровне.

Кроме того, все умения, кроме двух, имеют родительское умение, характеризующее более широкую область знаний. Это позволяет выстроить дерево умений с корневыми умениями «Гибкие навыки» и «Твердые навыки».

3.2. ФОРМИРОВАНИЕ ГРУППЫ ЭКСПЕРТОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЯМИ

Метод формирования группы исполнителей для совместного решения задач реализован в системе управления компетенциями в виде функционала для профиля задачи. При реализации метода были использованы языки программирования Java и JavaScript, а также фреймворк JavaSpring.

Пример результата выполнения метода представлен на рис. 3. Страница результата содержит информацию о задаче и все варианты групп экспертов, сформированные методом. Каждый вариант состоит из списка резидентов, способных выполнить задачу, относительного коэффициента оптимальности группы, стоимостей работ каждого резидента и общей стоимости группы. Общая стоимость работы группы экспертов рассчитывается по формуле (10). Относительный коэффициент оптимальности группы рассчитывается по формуле

$$O(rel)_i = \frac{O_i}{\max_{i \in F} (O_i)} 100 \% , \quad (16)$$

где F – количество найденных решений.

Таким образом, относительный коэффициент оптимальности варианта группы исполнителей представляет собой отношение между коэффициентом оптимальности этого варианта и наибольшим коэффициентом оптимальности среди сформированных вариантов. Такие относительные коэффициенты оптимальности удобны для сравнения вариантов между собой.

3.3. ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

Для автоматизации функционирования технопарка информация о его резидентах была собрана в разработанной системе управления компетенциями. Для этого была применена процедура внесения данных, состоящая из трех шагов.

Разработка системы управления компетенциями

Залудить на сервере Технопарк систему управления компетенциями.
 Сделать её удобной для пользователей.
 Заполнить данными о резидентах Технопарка.
 Реализовать алгоритм формирования групп.

Вариант 1/2 (оптимальность: 100.0%)
 Общая стоимость: 114

Резиденты	Компетенции	Стоимость
E-Contenta	Рекомендующие системы - 1 / 1	2
International Research Laboratory «Intelligent Technologies for Socio-Cyberphysical Systems» (МНП «Интеллектуальные технологии для социо-киберфизических систем»)	Рекомендующие системы - 1 / 1 Управление компетенциями - 1 / 1 Программирование на языке Java - 2 / 2	16

Рис. 3. Пример результата выполнения метода формирования группы исполнителей

Fig. 3. An example of the result of executing the method of forming a group of performers

Первый шаг состоял из представления системы управления компетенциями резидентам технопарка. Им рассказали о предназначении системы, ее функциональности, а также о том, какие данные и как необходимо вносить в систему. Второй шаг производился через несколько дней, когда данные были занесены резидентами. Внесенные данные были проверены на наличие ошибок и релевантность, при необходимости была добавлена недостающая информация. На третьем шаге поправки были приняты или скорректированы резидентами, а также были выставлены уровни владения компетенциями.

В результате описанной процедуры в систему управления компетенциями были внесены полные данные о реальных экспертах, необходимые для работы метода. Также администрацией технопарка были внесены несколько задач и информация о них.

Для тестирования метода и оценки его результатов он был применен для каждой задачи в системе. Участвовавшие в этом процессе менеджеры проектов, связанных с этими задачами, сообщали, насколько каждый вариант группы исполнителей, сформированной методом, удовлетворяет реальным требованиям. В большинстве случаев результаты, полученные методом, совпадали с ожиданием менеджеров, т. е. менеджеры проектов назначили бы одну из групп, сформированную методом, на выполнение проекта. Это позволяет сделать вывод, что метод работает корректно и эффективно.

3.4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА

Эффективность метода оценивалась с точки зрения скорости получения результатов для наборов исходных данных разных размеров. Под результатом в данном случае понимается сформированный и отсортированный по коэффициенту оптимальности список групп экспертов, удовлетворяющих заданным требованиям.

Для оценки эффективности метода была разработана методология оценки, определяющая параметры, которые будут использоваться для формирования наборов данных, на основе которых будут получены результаты. Эта методология и ее параметры описаны далее.

3.4.1. МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ

Как было описано выше, скорость работы метода и, следовательно, получения результатов зависит от количества экспертов и навыков. Однако сложность метода была рассчитана для случая, когда количество требований в задаче совпадало с количеством навыков, тогда как на практике задачи содержат в требованиях лишь малую часть навыков. Поэтому для оценки реальной скорости работы метода целесообразно изменять количество экспертов и количество требований в одной конкретной задаче.

В системе управления компетенциями 558 навыков. Это число не изменялось в течение оценки эффективности. На момент начала оценки эффективности в системе было 32 резидента. У каждого из них в среднем 10 компетенций с разными уровнями владения. Для оценки эффективности была создана задача, содержащая 7 требований с разными уровнями владения, что соответствует реальному описанию задачи.

Для формирования наборов данных, на основе которых будут получены результаты, были определены параметры случайной генерации экспертов и требований. Эти параметры включают в себя шаг генерации и особые требования к генерируемым экспертам и требованиям. Шаг генерации определяет количество генерируемых объектов за один раз, после которого производится оценка скорости получения результатов. Таким образом, на каждом шаге генерации после того, как было сгенерировано определенное количество требований или экспертов, запускалось выполнение метода и оценивалась скорость его выполнения для текущего набора данных. Особые требования к генерируемым экспертам и требованиям необходимы для того, чтобы сгенерированные эксперты и требования были близки к реальным и не возникала ситуация, когда получение результатов невозможно.

Шаг генерации резидентов составлял 5000. Было сделано 7 шагов, т. е. максимальное количество резидентов, для которого оценивалась скорость получения результатов, – 35 032. Каждый сгенерированный резидент имел от 5 до 10 компетенций, генерируемых случайным образом. Для каждой из этих компетенций случайным образом определялся навык, которым эксперт ещё не владеет, и уровень владения им.

Шаг генерации требований составлял 10 требований. Было сделано 5 шагов, т. е. максимальное количество требований, для которого оценивалась скорость получения результатов, – 57. Для каждого из сгенерированных требований случайным образом определялся навык и уровень владения им таким образом, чтобы этим навыком на данном уровне владел хотя бы один эксперт, при этом уровень владения был не выше, чем 75 % от максимального уровня владения выбранным навыком. Благодаря этому все генерируемые требования были выполнимы, а результаты могли быть получены для любого сформированного набора данных.

Описанные параметры позволяют сгенерировать 48 наборов данных, на основе которых возможно оценить скорость получения результатов.

Для каждого набора 10 раз запускался метод формирования группы экспертов и высчитывалось время, за которое были получены результаты. На основе этого высчитывалось среднее время получения результатов для данного набора. Затем все сгенерированные объекты удалялись и наборы формировались заново, после чего процедура оценки времени получения результатов для всех наборов повторялась. Всего было произведено 5 таких итераций, на основе которых были рассчитаны средние скорости получения результата для наборов всех размеров. Таким образом, при оценке скорости работы получения результатов метод формирования группы экспертов запускался $48 \cdot 10 \cdot 5 = 240$ раз и было получено 48 усредненных значений.

3.4.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ

Результаты оценки скорости работы метода формирования группы экспертов представлены на рис. 4. Вертикальная ось обозначает усредненное время получения результатов для различных наборов данных в миллисекундах. Горизонтальная ось обозначает количество экспертов в системе. Цвета линий обозначают количество требований. Как видно из графика, скорость получения результатов слегка уменьшается при увеличении количества резидентов и заметно уменьшается при увеличении количества требований. Однако изменения скорости линейны, и даже для максимального набора данных, содержащего 35 032 резидента и задачу с 57 требованиями, время получения результатов меньше 25 секунд. При этом на наборах данных, более приближенных к реальным ситуациям, результаты получаются очень быстро. Таким образом, оценка эффективности подхода показала его применимость в различных ситуациях, в том числе для большого количества данных.

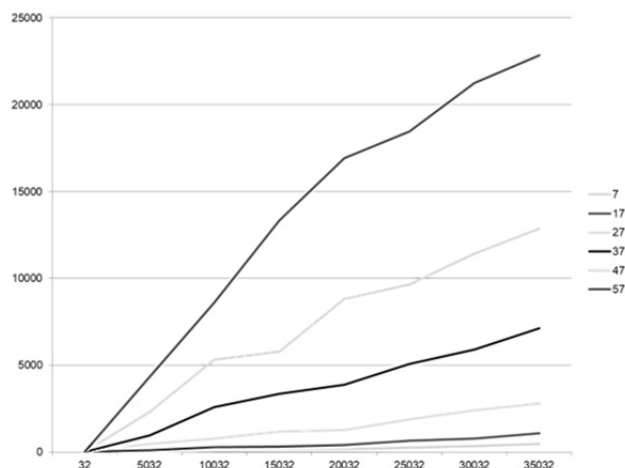


Рис. 4. Усредненное время получения результатов для различных наборов данных

Fig. 4. Averaged time to get results for different data sets

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены исследования, посвященные формированию группы исполнителей для совместного выполнения задач. Метод, предложенный в этой статье, учитывает многие аспекты формирования экспертной группы, способной эффективно выполнять поставленную задачу. Кроме того, метод предлагает несколько альтернативных вариантов групп экспертов, чтобы сделать процесс назначения экспертов более информированным.

Метод был реализован, протестирован и оценен в системе управления компетенциями Технопарка Университета ИТМО. Результат применения метода на реальных данных и опроса менеджеров задач показал, что он работает корректно и эффективно. Высокая скорость работы метода на больших объемах сгенерированных данных доказывает, что метод может быть применен в крупных системах.

Дальнейшая работа над методом предполагает дополнительные исследования в области управления персоналом для выявления критериев, которые могут быть использованы при подборе экспертов для совместного выполнения задач. В случае выявления существенных критериев, которые не учитываются методом, следует внести их в систему и соответствующим образом изменить алгоритм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A survey on expert finding techniques / S. Lin, W. Hong, D. Wang, T. Li // *Journal of Intelligent Information Systems*. – 2017. – Vol. 49. – P. 255–279. – DOI: 10.1007/s10844-016-0440-5.
2. Liu Z., Zhang Y. Structures or texts? A dynamic gating method for expert finding in CQA services // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2018. – Vol. 10828. – P. 201–208. – DOI: 10.1007/978-3-319-91458-9_12.
3. A team formation model based on knowledge and collaboration / H. Wi, S. Oh, J. Mun, M. Jung // *Expert Systems with Applications*. – 2009. – Vol. 36. – P. 9121–9134. – DOI: 10.1016/j.eswa.2008.12.031.
4. Liang S., Rijke M. Formal language models for finding groups of experts // *Information Processing & Management*. – 2016. – Vol. 4. – P. 529–549. – DOI: 10.1016/j.ipm.2015.11.005.
5. Ioannidis E., Varsakelis N., Antoniou I. Experts in knowledge networks: central positioning and intelligent selections // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2019. – Vol. 509. – P. 890–905. – DOI: 10.1016/j.physa.2018.06.003.
6. Enterprise system as business intelligence and knowledge capabilities for enhancing applications and practices of IT governance / F.M. Alkhalidi, S.M. Hammami, S. Kasem, A. Rashed, M.N. Alraja // *International Journal of Organizational and Collective Intelligence*. – 2017. – Vol. 7. – P. 63–77. – DOI: 10.4018/IJOCI.2017040105.
7. Competency management system for technopark residents: smart space-based approach / A. Smirnov, A. Kashevnik, S. Balandin, O. Baraniuc, V. Parfenov // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. – 2016. – P. 15–24. – (LNCS; vol. 9870).
8. Степаненко В.А., Кашевник А.М., Гуртов А.В. Контекстно-ориентированное управление компетенциями в экспертных сетях // *Труды СПИИРАН*. – 2018. – Вып. 4 (59). – С. 164–191.
9. Petrov M., Kashevnik A., Stepanenko V. Competence-based method of human community forming in expert network for joint task solving // *Digital Transformation and Global Society: Third International Conference, DTGS 2018, St. Petersburg, Russia*. – Cham: Springer, 2018. – P. 24–38.

10. *Petrov M.V., Kashevnik A.M.* Expert group formation for task performing: competence-based method and implementation // Proceedings of the 23rd Conference of Open Innovations Association FRUCT. – Finland: FRUCT Oy, 2018. – P. 315–320.
11. *Мельник П.Б.* Методика формирования экспертных пулов и групп для проведения экспертно-аналитических исследований // Инноватика и экспертиза. – 2017. – № 1 (19). – С. 39–54.
12. A survey on expert finding techniques / S. Lin, W. Hong, D. Wang, T. Li // Journal of Intelligent Information Systems. – 2017. – Vol. 49. – P. 255–279. – DOI: 10.1007/s10844-016-0440-5.
13. *Xu J., He R.* Expert recommendation for trouble ticket routing // Data & Knowledge Engineering. – 2018. – Vol. 116. – P. 205–218. – DOI: 10.1016/j.datak.2018.06.004.
14. *Karimi-Majd A., Mahootchi M., Zakery A.* A reinforcement learning methodology for a human resource planning problem considering knowledge-based promotion // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2017. – Vol. 79. – P. 87–99. – DOI: 10.1016/j.simpat.2015.07.004.
15. A hybridization of genetic algorithms and fuzzy logic for the single-machine scheduling with flexible maintenance problem under human resource constraints / M. Touat, S. Bouzidi-Hassini, F. Benbouzid-Sitayeb, B. Benhamou // Applied Soft Computing. – 2017. – Vol. 59. – P. 556–573.
16. *Zhang L.* An inverse optimization model for human resource allocation problem considering competency disadvantage structure // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 112. – P. 1611–1622. – DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.248.
17. *Rybak J., Balog K., Nørvåg K.* Temporal expertise profiling // Lecture Notes in Computer Science. – 2014. – Vol. 8416. – P. 540–546. – DOI: 10.1007/978-3-319-06028-6_54.

Петров Михаил Владимирович, младший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. Основное направление научных исследований – управление компетенциями, профилирование, управление знаниями. Имеет 10 публикаций. E-mail: mikhail.petrov@iias.spb.su

Petrov Mikhail Vladimirovich, a junior research fellow in SPIIRAS. The main field of his research covers compensation control, profiling, and knowledge management He is the author of 10 publications. E-mail: mikhail.petrov@iias.spb.su

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-49-68

Formation of an expert group for joint problem solving: the competence method and its implementation*

M.V. PETROV

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

ITMO University, 49, Kronversky Pr., St. Petersburg, 197101, Russian Federation

mikhail.petrov@iias.spb.su

Abstract

Project management in large organizations and enterprises is a complex, time-consuming process. Automated experts search and appointing to projects in which they will be most useful increases the efficiency of personnel management and reduces the number of errors in this area compared to manual assignment. The method of forming a expert group presented in this article

* Received 05 February 2019.

The research results are part of projects No. 18-37-00377 and 16-29-12866 funded by the Russian Foundation for basic research, as well as the budget theme No. 0073-2019-0005.

implements this process. This method takes into account various parameters for searching and comparing experts such as their competence, the cost of work and the psychological influence degree of experts on each other. The group optimality index is used by the method for this purpose and it depends on these parameters. All the variants of expert groups formed are sorted by the group's optimality coefficient. Each of the variants provided fully meets the specified requirements. The system also provides an opportunity to compare the variants in terms of the group's optimality coefficient and the total cost of work to select the most appropriate one. This article describes the results of this method implementation in the competence management system and its testing. The efficiency and effectiveness of the method on real data are shown as well as the possibility of applying the described method for large amounts of data maintaining high execution speed. Further expanding of the set of criteria used in the formation of expert groups is planned, so the most suitable variants for the organization could be found.

Keywords: joint problem solving, expert networks, competence management systems, expert groups, project management, expert search, personnel management automation, competences

REFERENCES

1. Lin S., Hong W., Wang D., Li T. A survey on expert finding techniques. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2017, vol. 49, pp. 255–279. DOI: 10.1007/s10844-016-0440-5.
2. Liu Z., Zhang Y. Structures or texts? A dynamic gating method for expert finding in CQA services. *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 10828, pp. 201–208. DOI: 10.1007/978-3-319-91458-9_12.
3. Wi H., Oh S., Mun J., Jung M. A team formation model based on knowledge and collaboration. *Expert Systems with Applications*, 2009, vol. 36, pp. 9121–9134. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.12.031.
4. Liang S., Rijke M. Formal language models for finding groups of experts. *Information Processing & Management*, 2016, vol. 4, pp. 529–549. DOI: 10.1016/j.ipm.2015.11.005.
5. Ioannidis E., Varsakelis N., Antoniou I. Experts in knowledge networks: central positioning and intelligent selections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, vol. 509, pp. 890–905. DOI: 10.1016/j.physa.2018.06.003.
6. Alkhalidi F.M., Hammami S.M., Kasem S., Rashed A., Alraja M.N. Enterprise system as business intelligence and knowledge capabilities for enhancing applications and practices of IT governance. *International Journal of Organizational and Collective Intelligence*, 2017, vol. 7, pp. 63–77. DOI: 10.4018/IJOCI.2017040105.
7. Smirnov A., Kashevnik A., Balandin S., Baraniuc O., Parfenov V. Competency management system for technopark residents: smart space-based approach. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. LNCS*, vol. 9870, 2016, pp. 15–24.
8. Stepanenko V.A., Kashevnik A.M., Gurtov A.V. Kontekstno-orientirovannoe upravlenie kompetentsiyami v ekspertnykh setyakh [Context-oriented competence management in expert networks]. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, iss. 4 (59), pp. 164–191.
9. Petrov M., Kashevnik A., Stepanenko V. Competence-based method of human community forming in expert network for joint task solving. *Digital Transformation and Global Society: Third International Conference, DTGS 2018*, St. Petersburg, Russia. Cham, Springer, 2018, pp. 24–38.
10. Petrov M.V., Kashevnik A.M. Expert group formation for task performing: competence-based method and implementation. *Proceedings of the 23rd Conference of Open Innovations Association FRUCT*. Finland: FRUCT Oy, 2018, pp. 315–320.
11. Mel'nik P.B. Metodika formirovaniya ekspertnykh pulov i grupp dlya provedeniya ekspertno-analiticheskikh issledovaniy [Methodology of formation of expert pools and groups for conduction of expert-analytical researches]. *Innovatika i ekspertiza – Innovatics and Expert Examination*, 2017, vol. 19, pp. 39–54.
12. Lin S., Hong W., Wang D., Li T. A survey on expert finding techniques. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2017, vol. 49, pp. 255–279. DOI: 10.1007/s10844-016-0440-5.

13. Xu J., He R. Expert recommendation for trouble ticket routing. *Data & Knowledge Engineering*, 2018, vol. 116, pp. 205–218. DOI: 10.1016/j.datak.2018.06.004.
14. Karimi-Majd A., Mahootchi M., Zakery A. A reinforcement learning methodology for a human resource planning problem considering knowledge-based promotion. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2017, vol. 79, pp. 87–99. DOI: 10.1016/j.simpat.2015.07.004.
15. Touat M., Bouzidi-Hassini S., Benbouzid-Sitayeb F., Benhamou B. A hybridization of genetic algorithms and fuzzy logic for the single-machine scheduling with flexible maintenance problem under human resource constraints. *Applied Soft Computing*, 2017, vol. 59, pp. 556–573.
16. Zhang L. An inverse optimization model for human resource allocation problem considering competency disadvantage structure. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 112, pp. 1611–1622. DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.248.
17. Rybak J., Balog K., Nørvåg K. Temporal expertise profiling. *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, vol. 8416, pp. 540–546. DOI: 10.1007/978-3-319-06028-6_54.

Для цитирования:

Петров М.В. Формирование группы исполнителей для совместного решения задач: основанный на компетенциях метод и его реализация // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 49–68. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-49-68.

For citation:

Petrov M.V. Formirovanie gruppy ispolnitelei dlya sovmestnogo resheniya zadach: osnovannyi na kompetentsiyakh metod i ego realizatsiya [Formation of a performers group for joint problem solving: competence method and implementation]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 49–68. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-49-68.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 519.233.22

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-69-88

Анализ входных условий в модели информационной безопасности, построенной на основе аппарата редких событий*

Г.А. ПОПОВ^a, Е.А. ПОПОВА^b, О.В. ВАСИЛЬЕВА^c

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

^a popov@astu.org ^b e.popova@astu.org ^c vasilyevaov26@gmail.com

Рассматривается задача оценки вероятности совершения злоумышленного действия в условиях, когда исходный процесс обеспечения информационной безопасности является регенерирующим. Особый интерес представляет анализ вероятности и возможного момента реализации злонамеренной атаки. Указанная вероятность обычно очень мала, что позволяет говорить о вероятности успешного совершения атаки как о редком событии. Тогда момент успешной реализации этой атаки в рамках восстанавливаемых систем может рассматриваться как момент первого наступления некоторого события (редкого события). Моменты регенерации рассматриваемого процесса восстановления могут быть моментами проведения профилактических и проверочных мероприятий. Таким образом, предполагается, что вероятность злоумышленного действия мала, а исходный процесс является регенерирующим. Проведена формализация исходных условий, которые необходимы для последующего изучения указанной вероятности на основе методов математического и компьютерного моделирования. Поскольку в рассматриваемой постановке процессы поступления потока злоумышленных атак и потока противодействия им неоднородны, то введены нормирующие функции для сравнения этих потоков. Для указанных нормирующих функций получены предельные соотношения, представляющие собой показательные соотношения. Приведены альтернативные формулировки исходных условий, и доказана их эквивалентность исходным условиям. Показано, что при выполнении приведенных условий процессы поступления злоумышленных атак и противодействия им могут быть разбиты на отдельные группы, каждая из которых обладает свойством асимптотической сходимости, т. е. может рассматриваться как поступления одного и того же источника для данной группы. Полученные соотношения могут быть использованы для разбиения поступающих атак по отдельным источникам атак.

Ключевые слова: злоумышленное действие, неоднородный регенерирующий процесс, поток злоумышленных атак, вероятность злоумышленной атаки, поток результатов противодействия, редкое событие, время до совершения атаки, нормирующие функции, предельные соотношения, разбиение входящего потока по источникам

* Статья получена 01 февраля 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Многие задачи анализа информационной безопасности можно свести к исследованию восстанавливаемых систем. Особый интерес представляет анализ вероятности и возможного момента реализации злонамеренной атаки. Указанная вероятность обычно очень мала, что позволяет говорить о вероятности успешного совершения атаки как о редком событии. Тогда момент успешной реализации этой атаки в рамках восстанавливаемых систем может рассматриваться как момент первого наступления некоторого события (редкого события), вероятность которого можно считать исчезающе малой (см.: [1, 2, 4]). Momentами регенерации рассматриваемого процесса восстановления могут быть моменты проведения профилактических и проверочных мероприятий.

Для анализа моделей описанного типа часто применяется теорема А.Д. Соловьева [5] для однородных регенерирующих процессов. Однако, в системах информационной безопасности условие однородности не соответствует реальному положению дел, так как постоянно меняются характеристики злонамеренных угроз: злоумышленник активно ищет возможные пути преодоления систем защиты; устаревают имеющиеся программно-аппаратные и технические средства защиты, внедряются новые, более совершенные. Поскольку событие нарушения безопасности происходит достаточно редко, захватывая большие интервалы времени, то указанные изменения существенны для анализа этих событий. Поэтому необходимо при анализе вероятности совершения злонамеренной атаки учитывать неоднородность в соответствующих моделях. Данная работа посвящена построению модели процесса совершения злонамеренной атаки на основе аппарата редких событий в регенерирующих неоднородных процессах. Работ по однородным регенерирующим процессам применительно к задачам анализа надежности систем достаточно много, перечень многих важных работ по данной тематике приведен в работе [2].

Проблема изучения редких событий актуальна во многих сферах деятельности. В частности, в теории надежности [3], при оценке рисков, особенно связанных с чрезвычайными ситуациями, которые происходят достаточно редко [8], а также в ситуациях, связанных с корпоративными рисками [16], при моделировании поведения больших скоплений людей [9], прогнозировании эксплуатационных процессов в сложных системах машиностроения [10], в задачах компьютерного тестирования [11] и имитационного моделирования сложных систем [12, 13], при поиске закономерностей в больших базах данных (Data Mining) [15]. При этом существующие методы анализа редких событий часто недостаточно эффективны. Из известных методов кроме упомянутого выше результата А.Д. Соловьева [5] отметим также исследования редких событий на основе аппарата регрессий [14] и математического моделирования рекуррентных событий [17].

Ранее в работе [1] была представлена формализованная модель, предназначенная для количественного анализа показателей информационной безопасности. Эта модель опирается на аппарат редких событий. В работе в самой общей постановке приведены условия, позволяющие ввести определенный уровень регулярности всех рассматриваемых процессов, связанных с проявлением угроз информационной безопасности. Настоящая работа является продолжением работы [1], где представлена модель процесса совершения злонамеренной атаки. В основе модели – аппарат редких событий в реге-

нерирующих неоднородных процессах. В работе получен ряд соотношений, устанавливающих количественные взаимосвязи между различными характеристиками построенной модели.

Аналогичный подход ранее был рассмотрен в теории надежности [2]. Наиболее близкой к данной работе по методам исследования является работа [7].

1. ОПИСАНИЕ ФОРМАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ

Пусть задан случайный процесс $\kappa(t)$ и $t_0 = 0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < \dots$ есть точки регенерации процесса $\kappa(t)$ (моменты времени совершения действий, связанных с нарушением ИБ). Предположим, что в некоторый момент $t_{n-1} + \eta_n$ ($0 \leq \eta_n < \xi_n$) на каждом промежутке $[t_{n-1}, t_n)$ может произойти или не произойти некоторое событие A_n (в нашем случае – успешная атака, связанная с нарушением ИБ), причем событие A_n и величина η_n определены на классе траекторий $\{\kappa(t), t_{n-1} \leq t < t_n\}$ и, таким образом, не зависят от поведения процесса $\kappa(t)$ вне промежутка $[t_{n-1}, t_n)$. Пусть χ_k есть индикатор события A_k , τ_n – случайный момент первого после t_{n-1} появления одного из событий A_k ($k \geq n$); $\zeta_n \stackrel{def}{=} \xi_n(1 - \chi_n) + \eta_n \chi_n$. Введем следующие обозначения ($n \geq 1; z \geq 0$):

$$\varphi_n(z) = M(e^{-z\zeta_n}), \quad \overline{\varphi}_n(z) = 1 - \varphi_n(z), \quad q_n = P\{\chi_n = 1\},$$

$$\varphi_n^-(z) = M(e^{-z\zeta_n} \chi_n), \quad \varphi_n^+(z) = M(e^{-z\zeta_n} (1 - \chi_n)), \quad \pi_n(z) = \overline{\varphi}_n(z) + \varphi_n^-(z),$$

где M – знак математического ожидания. Заметим, что $\overline{\varphi}_n(0) = 0$ и $\varphi_n^-(0) = q_n$.

В дальнейшем все введенные характеристики будут являться функциями некоторого параметра $\gamma \in \Theta$ (т. е. $q_n = q_n(\gamma)$, $\varphi_n^-(z) = \varphi_n^-(\gamma, z)$, $\pi_n(z) = \pi_n(\gamma, z)$ и т. д.), где Θ – некоторое множество на действительной прямой, для которого точка 0 является предельной точкой. Всюду ниже запись « $\gamma \rightarrow 0$ » означает, что $\gamma \rightarrow 0$ так, что $\gamma \in \Theta$.

Ниже приводятся и исследуются условия, наличие которых предполагается при доказательстве основных результатов. При этом всю совокупность условий можно разбить на группы и охарактеризовать следующим образом.

Приведем точные формулировки перечисленных условий.

А) Существуют функции $g_n(\gamma)$ и $m(\gamma)$ ($n \geq 1 - 1/\gamma \in \Theta$) такие, что $\lim_{\gamma \rightarrow 0} m(\gamma) = \lim_{\gamma \rightarrow 0} g_n(\gamma) = 0$ и при любых $n \geq 1, z > 0$ существует предел

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \overline{\varphi}_n(m(\gamma)z) g_n(\gamma) \right\}^{-1} \stackrel{def}{=} \omega_n(z), \quad \omega_n(1) = 1. \quad (1)$$

Б) Справедливо соотношение $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \sup_{n \geq 1} q_n(\gamma) = 0$.

Прежде чем описывать остальные условия, введем обозначения ($n \geq 1$, $\gamma > 0$):

$$S_1(n, \gamma) = \sum_{k=1}^n q_k(\gamma), \quad S_2(n, \gamma) = \sum_{k=1}^n g_k(\gamma).$$

Ниже часто для простоты вместо обозначения $S_i(n, \gamma)$ будет использовано обозначение $S_i(n)$.

В) Для любых $\gamma > 0$ и целых $n > 0$ справедливы соотношения

$$S_i(n) = n^{\theta_i} L_i(n) \cdot G_i(\gamma) (1 + \alpha_i(n, \gamma)) \quad (i = \overline{1, 2}), \quad (2)$$

где $\theta_i \geq 0$, $L_i(x)$ ($x > 0$) – медленно меняющаяся функция (ММФ),
 $\lim_{n \rightarrow \infty, \gamma \rightarrow 0} \alpha_i(n, \gamma) = 0$.

Как показано в [1], справедливы соотношения

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} G_i(\gamma) = 0 \quad (i = \overline{1, 2}). \quad (3)$$

При этом необходимо $\theta_2 \leq 1$ и $\lim_{\gamma \rightarrow 0} (\lambda_i(\gamma)) = +\infty$ для $i = 1, 2$.

Положим $\lambda(\gamma) = \min(\lambda_1(\gamma), \lambda_2(\gamma))$.

Г) Существует предел

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} (\lambda_1(\gamma) / \lambda_2(\gamma)) \stackrel{def}{=} \lambda_0, \quad 0 \leq \lambda_0 \leq +\infty. \quad (4)$$

Д) Для любого фиксированного $x > 0$ условие (1) выполняется равномерно по $n \leq x\lambda(\gamma)$, т. е.

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \max_{1 \leq n \leq x\lambda(\gamma)} \left| \bar{\varphi}_n(m(\gamma) \cdot z) (g_n(\gamma))^{-1} - \omega_n(z) \right| \right\} = 0. \quad (5)$$

Е) Равномерно по k и $x \in (a, b)$, где a и b ($0 < a < b < +\infty$) – произвольные числа, для любого $T \geq 1$ имеют место соотношения:

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^T \left\{ Q_{i_j^{(k)}}(\gamma) \cdot \chi(i_j^{(k)} \leq x\lambda(\gamma)) \right\} = 0; \quad (6)$$

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \sum_{m \in N_k, m \leq x\lambda(\gamma)} g_m(\gamma) \stackrel{def}{=} \mu_k(x), \quad (7)$$

где $Q_n(\gamma) = g_n(\gamma) + q_n(\gamma)$ ($n \geq 1$), при $|N_k| < +\infty$ полагаем $Q_n(\lambda) = 0$ для $n > |N_k|$; $\chi(A)$ есть индикатор события A ; множества N_k вводятся в утверждении леммы 2 работы [1].

Условие (6) можно заменить на следующее условие: для любого $T \geq 1$ равномерно по k ($1 \leq k \leq M$) и $x \in (a, b)$, где a и b ($0 < a < b < \infty$) – любые числа, существуют пределы:

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \sum_{k=1}^n Q_{i_j^{(k)}}(\gamma) \left(\sum_{m \in N_k, m \leq x\lambda(\gamma)} Q_{i_j^{(k)}}(\gamma) \right)^{-1} \right\} = 0. \quad (8)$$

Вместо выполнения совокупности условий В) и Г) можно потребовать выполнение следующих более общих условий В') и Г').

В') Существует функция $\lambda(\gamma)$ ($\gamma > 0$) такая, что для любого $x > 0$ существуют пределы ($i = 1, 2$)

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} S_i(x\lambda(\gamma)) \stackrel{def}{=} \sigma_i(x) < +\infty, \quad \max(\sigma_1(x), \sigma_2(x)) \neq 0.$$

Г') Существуют функции $\varphi_1(x), \varphi_2(x)$ ($x > 0$) и числа $\gamma_0, A > 0$ такие, что для всех $x > A$ и $i = 1, 2; j = \overline{3, 5}$

$$\inf_{|\gamma| \leq \gamma_0} |S_i(x\lambda(\gamma))| \geq \vartheta_1(x), \quad \sup_{|\gamma| \leq \gamma_0} |S_i(x\lambda(\gamma))| \leq \vartheta_2(x),$$

причем для любого $P < 1$

$$\int_A^\infty e^{-P\varphi_1(y)} d\varphi_2(y) < \infty. \quad (9)$$

Из условия В' следует $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \lambda(\gamma) = +\infty$. Справедливы соотношения ($x > 0$)

$$\sum_{k=1}^\infty \mu_k(x) = \sigma_2(x), \quad (10)$$

Можно считать, что функции $\vartheta_1(y)$ и $\vartheta_2(y)$ монотонно не убывают с ростом y .

2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Лемма 1. При фиксированном $z > 0$ равномерно по $n \geq 1$ имеют место соотношения:

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \varphi_n^-(m(\gamma)z)(g_n(\gamma))^{-1} \right\} = 1; \quad (11)$$

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \sup_{n \geq 1} g_n(\gamma) = 0. \quad (12)$$

Доказательство. Докажем вначале (11). Предположим противное, т. е. существуют последовательности $\{n_k, k \geq 1\}$ и $\{\gamma_k, k \geq 1\}$ такие, что

$$\lim_{k \rightarrow \infty} n_k = +\infty, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \gamma_k = 0 \quad \text{и} \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \left\{ 1 - \varphi_n^-(\gamma_k, m(\gamma_k))(q_{n_k}(\gamma_k))^{-1} \right\} = \Delta > 0. \quad \text{По-}$$

сколькxу $q_n(\gamma) = P(\chi_n = 1)$ и $\Phi_n^-(\gamma_k, m(\gamma_k))(q_{n_k}(\gamma_k))^{-1} = P\left(\frac{e^{-\gamma_k m(\gamma_k) \zeta_n} \chi_n}{\chi_n = 1}\right)$, то

последнее соотношение можно переписать в виде

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_0^{\infty} (1 - \exp\{m(\gamma_k) \cdot zx\}) d_x \Phi_{n_k}(\gamma_k, x) = \Delta > 0, \quad (13)$$

где $\Phi_n(\gamma, x) \stackrel{def}{=} P\{\zeta_n < x / \chi_n = 1\}$. По второй теореме Хелли из последовательности $\{\Phi_{n_k}(\gamma_k, x), k \geq 1\}$ можно выбрать подпоследовательность $\{\Phi_{n'_k}(\gamma'_k, x), k \geq 1\}$ такую, что $\Phi_{n'_k}(\gamma'_k, x) \Rightarrow \Phi(x)$ при $k \rightarrow \infty$, где $\Phi(x)$ – некоторая собственная функция распределения (ФР) и « \Rightarrow » – знак слабой сходимости. Но тогда в силу замечания 2 [6, с. 319] имеем

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_0^{\infty} (1 - \exp\{m(\gamma_k) \cdot zx\}) d_x \Phi_{n_k}(\gamma_k, x) = \int_0^{\infty} \lim_{k \rightarrow \infty} (1 - \exp\{m(\gamma_k) \cdot zx\}) d\Phi(x) = 0,$$

что противоречит (13). Соотношение (11) доказано.

Для доказательства (12) также предположим противное, т. е. существуют последовательности $\{n_k, k \geq 1\}$ и $\{\gamma_k, k \geq 1\}$ такие, что $\lim_{k \rightarrow \infty} n_k = +\infty$,

$\lim_{k \rightarrow \infty} \gamma_k = 0$ и $\lim_{k \rightarrow \infty} g_{n_k}(\gamma_k) = g > 0$. Опираясь на вторую теорему Хелли,

без ограничения общности можно предположить, что $P(\xi_{n_k} < x) \Rightarrow F(x)$,

где $F(x)$ – некоторая собственная ФР. Тогда из (1) следует:

$\lim_{k \rightarrow \infty} \Phi_{n_k}(m(\gamma_k)) = \lim_{k \rightarrow \infty} (g_{n_k}(\gamma_k) \cdot \omega_{n_k}(1)) = g$. Но в силу замечания 2 [5, с. 319]

имеем

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{\Phi}_{n_k}^-(m(\gamma_k)) = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_0^{\infty} \left(1 - \exp\left\{m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} \gamma_k\right)zx\right\}\right) dF(x) = 0.$$

Полученное противоречие доказывает справедливость (12).

Лемма 2. При выполнении условий В и Г равномерно по $x \in (a, b)$, где a и b ($0 < a < b < \infty$) – любые фиксированные числа, справедливы соотношения ($i = 1, 2$)

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} S_i(x\lambda(\gamma)) = m_i x^{\theta_i}, \quad (14)$$

где $m_1 = \min(1, \lambda_0^{-\theta_1})$, $m_2 = \min(1, \lambda_0^{\theta_2})$. В частности, $\max(m_1, m_2) = 1$.

Доказательство. Аналогично (6) из [1] получаем соотношения ($i = 1, 2$):

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} S_i(x\lambda(\gamma)) = x^{\theta_i} \lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \left(\frac{\lambda(\gamma)}{\lambda_i(\gamma)} \right)^{\theta_i} \frac{\tilde{L}_i(\lambda(\gamma))}{\tilde{L}_i(\lambda_i(\gamma))} \right\}. \quad (15)$$

Полагая $\alpha_i(\gamma) \stackrel{def}{=} \frac{\lambda(\gamma)}{\lambda_i(\gamma)}$ ($i = 1, 2$), из (15) выводим

$$\begin{aligned} \lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \left(\frac{\lambda(\gamma)}{\lambda_i(\gamma)} \right)^{\theta_i} \frac{\tilde{L}_i(\lambda(\gamma))}{\tilde{L}_i(\lambda_i(\gamma))} \right\} &= \exp \left\{ \lim_{\gamma \rightarrow 0} \int_{\alpha_i(\gamma)}^1 \frac{-\varepsilon_i(\lambda_i(\gamma)z) - \theta_i}{z} dz \right\} = \\ &= \lim_{\gamma \rightarrow 0} (\alpha_i(\gamma))^{\theta_i} = \left(\min \left(\lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\lambda_1(\gamma)}{\lambda_i(\gamma)}, \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\lambda_2(\gamma)}{\lambda_i(\gamma)} \right) \right)^{\theta_i}. \end{aligned} \quad (16)$$

Обоснование справедливости последних соотношений очевидно, когда $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \alpha_i(\gamma) > 0$. При $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \alpha_i(\gamma) = 0$ справедливость (16) следует из того, что

в этом случае, если для некоторой последовательности $\{\gamma_k, k \geq 1\}$ $\lim_{k \rightarrow \infty} \alpha_i(\gamma_k) = 0$, при достаточно больших k имеем $-\varepsilon_i(\lambda_i(\gamma_k)z) - \theta_i \leq -\theta_i / 2$ для всех $z \in (a_i)$, так как $\lambda_i(\gamma)z \geq \lambda(\gamma) \rightarrow +\infty$ при $\gamma \rightarrow 0$.

Значит,

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \int_{\alpha_i(\gamma)}^1 (-\varepsilon_i(\lambda_i(\gamma)z) - \theta_i) z^{-1} dz = -\infty.$$

Из (15), (16) и условия Г следует (14).

Далее в силу В имеем ($i = 3, 4, 5$)

$$\begin{aligned} \lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ S_i(x\lambda(\gamma)) R(\gamma)^{-1} \right\} &= x^{\theta_i} \lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \left(\frac{[x\lambda(\gamma)]}{x\lambda(\gamma)} \right)^{\theta_i} \times \right. \\ &\times \left. \frac{\tilde{L}_i([x\lambda(\gamma)])}{\tilde{L}_i(x\lambda(\gamma))} \frac{\tilde{L}_i(x\lambda(\gamma))}{\tilde{L}_i(\lambda(\gamma))} \frac{(\lambda(\gamma))^{\theta_i} \tilde{L}_i(\lambda(\gamma))}{R(\gamma)} G_i(\gamma) \right\} = \\ &= x^{\theta_i} \lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \frac{(\lambda(\gamma))^{\theta_i} \tilde{L}_i(\lambda(\gamma))}{R(\gamma)} G_i(\gamma) \right\}. \end{aligned}$$

На основе условия Г и определения $R(\gamma)$ получаем: существует предел ($i = 3, 4, 5$)

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \int (\lambda(\gamma))^{\theta_i} \tilde{L}_i(\lambda(\gamma)) R(\gamma)^{-1} \right\} = m_i,$$

откуда аналогично (6) из [1] выводим (15).

Лемма 3. Выполнение условий В и Г влечет выполнение условий В' и Г'.

Доказательство. Из (14) и (15) следует справедливость условия В'. Для доказательства условия Г' необходимо доказать существование чисел γ_0 и A и функций $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$ ($x > 0$) таких, что для всех $x > A$ $\max_{i=1,2} \sup_{|\gamma| \leq \gamma_0} S_i(x\lambda(\gamma)) \geq \varphi_1(x)$ и $\max_{1 \leq j \leq 3} \sup_{|\gamma| \leq \gamma_0} (S_j(x\lambda(\gamma)) / R(\gamma)) \leq \varphi_2(x)$.

В силу условия В аналогично (6) из [1] имеем

при $\gamma \in G \stackrel{def}{=} \{\gamma > 0: \lambda(\gamma) = \lambda_1(\gamma)\}$

$$S_1(x\lambda(\gamma)) = \left(\frac{[x\lambda_1(\gamma)]}{\lambda_1(\gamma)} \right)^{\theta_1} \frac{L_1([x\lambda_1(\gamma)])}{L_1(\lambda_1(\gamma))} (\lambda_1(\gamma))^{\theta_1} L_1(\lambda_1(\gamma)) G_1(\gamma). \quad (17)$$

В силу леммы 1 [1] существует число $\bar{\gamma}_1 > 0$ такое, что для всех γ ($|\gamma| \leq \bar{\gamma}_1$)

$$(\lambda_1(\gamma))^{\theta_1} L_1(\lambda_1(\gamma)) G_1(\gamma) \geq \frac{1}{2}.$$

Далее, существует $\bar{\gamma}_2 > 0$ такое, что для всех $x \geq 1$ имеем $\frac{1}{2} \leq \frac{[x\lambda(\gamma)]}{x\lambda(\gamma)} \leq 2$.

Воспользовавшись (5) из [1] и неравенством $[z]/z \leq 1$ ($z > 0$), для любого $\alpha > 0$ имеем

$$\begin{aligned} & \left(\frac{[x\lambda_1(\gamma)]}{\lambda_1(\gamma)} \right)^\alpha \frac{L_1([x\lambda_1(\gamma)])}{L_1(\lambda_1(\gamma))} = \\ & = \frac{c_1([x\lambda_1(\gamma)])}{c_1(x\lambda_1(\gamma))} \exp \left\{ \int_1^{[x\lambda_1(\gamma)]/(\lambda_1(\gamma))} \frac{\alpha}{u} du + \int_1^{[x\lambda_1(\gamma)]/(\lambda_1(\gamma))} \frac{\varepsilon(\lambda_1(\gamma)u)}{u} du \right\}. \quad (18) \end{aligned}$$

Отметим, что существует $x_1 > 1$ такое, что при $x \geq x_1$ $x/2 \leq [x\lambda_1(\gamma)]/(\lambda_1(\gamma)) \leq x$.

Поскольку $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \lambda_1(\gamma) = \infty$ (см. работу [1]) и существует $\bar{\gamma}_3 > 0$ такое, что для всех γ ($|\gamma| \leq \bar{\gamma}_3$) и $x \geq 1$ справедливо $\sup_{x \geq 1} \frac{c_1([x\lambda_1(\gamma)])}{c_1(x\lambda_1(\gamma))} \geq \frac{1}{2}$ и $\varepsilon(\lambda_1(\gamma)u) \geq -\frac{\alpha}{2}$ ($u \geq 1$), то из последнего соотношения для всех $x \geq \max(x_1, 2)$ и γ , $|\gamma| \leq \min(\bar{\gamma}_2, \bar{\gamma}_3)$, получаем

$$\begin{aligned} & \left(\frac{[x\lambda_1(\gamma)]}{\lambda_1(\gamma)} \right)^\alpha \frac{L_1([x\lambda_1(\gamma)])}{L_1(x\lambda_1(\gamma))} \geq \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{\alpha}{2} \int_1^x u^{-1} du + \alpha \int_1^{x/2} u^{-1} du \right\} \geq \\ & \geq \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{\alpha}{2} \ln x + \alpha \ln \left(\frac{1}{2} x \right) \right\} = x^{\alpha/2} \left(\frac{1}{2} \right)^{\alpha+1}. \quad (19) \end{aligned}$$

Из (17) и (19) следует, что для всех $x \geq x_1$ и $\gamma \in G$ ($|\gamma| \leq \min(\bar{\gamma}_2, \bar{\gamma}_2, \bar{\gamma}_3)$)

$$S_1(x\lambda_1(\gamma)) \geq \left(\frac{x}{2} \right)^{\theta_1 - \alpha} x^{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{2} \right)^{\alpha+1} = x^{\theta_1 - \frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{2} \right)^{\theta_1+1}. \quad (20)$$

Аналогично доказывается справедливость следующего соотношения для всех $x \geq x_2$, где $x_2 > 2$ – некоторая константа, и γ таких, что $\lambda(\gamma) = \lambda_2(\gamma)$:

$$S_2(x\lambda_2(\gamma)) \geq \left(\frac{x}{2}\right)^{\theta_2 - \alpha} x^{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{2}\right)^{\alpha+1} = x^{\theta_2 - \frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{2}\right)^{\theta_2+1}. \quad (21)$$

Из (20) и (21) следует: для всех $\gamma > 0$

$$\max_{i=1,2} S_i(x\lambda_i(\gamma)) \geq x^{\min(\theta_1, \theta_2) - \frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{2}\right)^{\max(\theta_1, \theta_2)+1},$$

т. е. выполнено первое условие Γ' с $A_1 = x_0 = \max(x_1, x_2)$ при

$$\alpha < 2 \min(\theta_1, \theta_2) \text{ и } \vartheta_1(x) = x^{\min(\theta_1, \theta_2) - \frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{2}\right)^{\max(\theta_1, \theta_2)+1}.$$

Аналогично (18) и (19) выводим: существуют $\bar{\gamma}_4 > 0$ такие, что для всех γ ($|\gamma| \leq \bar{\gamma}_4$), $x \geq x_3$, где $x_3 > 2$ – некоторая константа, и $j = 1, 2$ справедливо

$$\begin{aligned} \left(\frac{[x\lambda(\gamma)]}{\lambda(\gamma)}\right)^\alpha \frac{L_j([x\lambda(\gamma)])}{L_j(x\lambda(\gamma))} &\leq 2 \exp\left\{\frac{\alpha}{2} \int_1^x u^{-1} du + \alpha \int_1^x u^{-1} du\right\} \leq \\ &\leq 2 \exp\left\{\frac{\alpha}{2} \ln x + \alpha \ln x\right\} = 2x^{(3/2)\alpha}, \end{aligned}$$

откуда аналогично (17) получаем

$$S_j(x\lambda(\gamma)) = \left(\frac{[x\lambda(\gamma)]}{\lambda(\gamma)}\right)^{\theta_j} \frac{L_j([x\lambda(\gamma)])}{L_j(\lambda(\gamma))} (\lambda(\gamma))^{\theta_j} L_j(\lambda(\gamma)) G_j(\gamma).$$

Так как $L_j(\lambda(\gamma)) G_j(\gamma) \leq 2$ при достаточно малых γ , то аналогично доказывается справедливость второго условия Γ' с $A_2 = x_3$ и

$$\vartheta_2(x) = 2x^{\max(\theta_3, \theta_4, \theta_5) + \frac{3\alpha}{2}}.$$

Наконец, очевидно, что

$$\int_{\max(A_1, A_2)}^{\infty} \exp\{-p\vartheta_1(x)\} d\vartheta_2(x) < \infty$$

для любого $p > 0$.

Оставшаяся часть работы посвящена доказательству существования хотя бы одного разложения, удовлетворяющего лемме 2 из [1].

Пусть $\mathfrak{R} \stackrel{def}{=} \{\omega_n(z), n \geq 1\}$ и \mathfrak{J} есть замыкание \mathfrak{R} в смысле слабой (поточечной) сходимости. Для любых двух функций $\alpha(z)$, $\beta(z)$ положим

$$r(\alpha, \beta) = \sup_{z>0} \frac{z|\alpha(z) - \beta(z)|}{(1+z)^2}.$$

Нетрудно убедиться, что $r(\alpha, \beta)$ является метрикой на множестве функций $g(z)$, являющихся ПЛС некоторых мер и удовлетворяющих условию $\sup_{z>0} \frac{z|g(z)|}{(1+z)^2} < +\infty$.

Лемма 4. Множество $\mathfrak{I} \neq \emptyset$ и полно относительно сходимости по метрике r .

Доказательство. Из определения $w_n(z)$ ($n \geq 1, z > 0$) (условие А) следует, что $\frac{\omega_n(z)}{z}$ является пределом преобразований Лапласа–Стильтеса (ПЛС) некоторых мер и, следовательно, само является ПЛС некоторой меры. Значит, $\frac{\omega_n(z)}{z}$ непрерывна при $z > 0$ и монотонно не возрастает с ростом z . Отметим также, что, как нетрудно вывести из (1) (см. [1]), функция $w_n(z)$ для любого $n \geq 1$ монотонно не убывает с ростом z .

Поскольку множество $\{\omega_n(z), n \geq 1\}$ ($0 \leq z \leq 1$) состоит из монотонно возрастающих и ограниченных функций, то по первой теореме Хелли в этом множестве можно выбрать сходящуюся подпоследовательность $\{\omega_{i_k}(z), k \geq 1\}$,

$\lim_{k \rightarrow \infty} \omega_{i_k}(z) \stackrel{def}{=} \tilde{\psi}_1(z)$ ($0 \leq z \leq 1$). Аналогично из множества $\left\{ \frac{\omega_{i_k}(z)}{z}, k \geq 1 \right\}$ ($z \geq 1$) можно выбрать сходящуюся подпоследовательность $\left\{ \frac{\omega_{i'_k}(z)}{z}, k \geq 1 \right\}$,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\omega_{i'_k}(z)}{z} = \frac{\tilde{\psi}_2(z)}{z} \quad (z \geq 1).$$

Полагая $\tilde{\psi}(z) = \tilde{\psi}_1(z)$ при $z \in [0, 1]$ и $\tilde{\psi}(z) = \tilde{\psi}_2(z)$ при $z \geq 1$, заключаем, что $\tilde{\psi}(z) \in \mathfrak{I}$. Отсюда следует, что $\mathfrak{I} \neq \emptyset$.

Пусть $\psi(z) \in \mathfrak{I}$ – любая функция. Тогда по определению \mathfrak{I} существует последовательность $\{\omega_{i_k}(z), k \geq 1\}$ такая, что $\lim_{k \rightarrow \infty} \omega_{i_k}(z) \stackrel{def}{=} \psi(z)$ для всех $z > 0$. Отсюда совершенно так же, как и выше, заключаем, что функция $\psi(z)$, определенная для всех $z > 0$, не убывает с ростом $z > 0$, $\frac{\psi(z)}{z}$ является ПЛС некоторой меры (как предел ПЛС) и $\psi(1) = 1$ (см. [1]). Следовательно, $\psi(z)$ непрерывна при $z > 0$ и существуют пределы: $\lim_{z \rightarrow \infty} \frac{z\psi(z)}{(1+z)^2} < \infty$,

$\lim_{z \rightarrow 0} \frac{z\psi(z)}{(1+z)^2} = 0$. Поэтому для любого $k \geq 1$ существует $z_k \in [0, \infty)$ такое, что

$$r(\omega_{i_k}, \psi) = \frac{z_k |\omega_{i_k}(z_k) - \psi(z_k)|}{(1+z_k)^2}, \text{ где полагаем}$$

$$\left(\frac{z |\omega_{i_k}(z) - \psi(z)|}{(1+z)^2} \right) \Bigg|_{z=z_k} = \lim_{z \rightarrow \infty} \left\{ \frac{z^2}{(1+z)^2} \left| \frac{\omega_{i_k}(z)}{z} - \frac{\psi(z)}{z} \right| \right\} (< \infty).$$

Не ограничивая общности, можно считать, что существует предел $\lim_{k \rightarrow \infty} z_k = z_0 \in [0, \infty)$, в противном случае из $\{z_k, k \geq 1\}$ можно было бы взять сходящуюся подпоследовательность. Если предположить, что $z_0 = 0$, то получаем

$$\lim_{k \rightarrow \infty} r(\omega_{i_k}, \psi) \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{z_k |\omega_{i_k}(1) + \psi(1)|}{(1 + z_k)^2} = 0.$$

Пусть теперь $z_0 \neq 0$. Обозначим через $W_k(t)$ и $\Psi(t)$ ($t \geq 0$) ФР мер, имеющих ПЛС $\frac{\omega_k(z)}{z}$ и $\frac{\psi(z)}{z}$ соответственно. Тогда из сходимости

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\omega_k(z)}{z} = \frac{\psi(z)}{z}$$

следует, что $W_{i_k}(t) \Rightarrow \Psi(t)$ при $k \rightarrow \infty$. Отметим, что последняя сходимость имеет место равномерно на любом интервале $[a, b]$ ($0 \leq a \leq b < \infty$). Действительно, выберем $\varepsilon > 0$ и разбиение $\{t_i, i = \overline{1, n}\}$ ($n \geq 1$),

$a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b$ такое, что для всех $i = \overline{1, n}$ имеем $\Psi(t_i) - \Psi(t_{i-1}) < \varepsilon$. Далее, выберем $k_0 \geq 1$ такое, чтобы для всех $k \geq k_0$ и $j = \overline{1, n}$ имело место $|W_{i_k}(t_j) - \Psi(t_j)| < \varepsilon$. Тогда при $t \in [t_{j-1}, t_j]$ и $k \geq k_0$ следует

$$|W_{i_k}(t) - \Psi(t)| \leq |W_{i_k}(t_j) - \Psi(t_j)| \leq |W_{i_k}(t_j) - \Psi(t_j)| + |\Psi(t_j) - \Psi(t_{j-1})| < 2\varepsilon,$$

откуда вытекает справедливость отмеченного факта.

Имеем

$$\begin{aligned} r(\omega_{i_k}, \psi) &\leq z_k \left| \frac{\omega_{i_k}(z_k)}{z_k^2} - \frac{\psi(z_k)}{z_k^2} \right| = \left| \int_0^\infty e^{-u} \left(W_{i_k} \left(\frac{u}{z_k} \right) - \Psi \left(\frac{u}{z_k} \right) \right) du \right| \leq \\ &\leq \int_0^{2a} e^{-u} \left| W_{i_k} \left(\frac{u}{z_k} \right) - \Psi \left(\frac{u}{z_k} \right) \right| du + e^{-a} \left| \int_{2a}^\infty e^{-u/2} \left(W_{i_k} \left(\frac{u}{z_k} \right) - \Psi \left(\frac{u}{z_k} \right) \right) du \right| \leq \\ &\leq 2a \sup_{0 \leq u \leq 2a} \left| W_{i_k} \left(\frac{u}{z_k} \right) - \Psi \left(\frac{u}{z_k} \right) \right| + e^{-a} \int_0^\infty e^{-u/2} \left(W_{i_k} \left(\frac{u}{z_k} \right) + \Psi \left(\frac{u}{z_k} \right) \right) du \leq \\ &\leq 2a \sup_{0 \leq u \leq 2a} \left| W_{i_k} \left(\frac{u}{z_k} \right) - \Psi \left(\frac{u}{z_k} \right) \right| + e^{-a} (\omega_{i_1}(z_k/2) + \psi(z_k/2)). \end{aligned} \quad (22)$$

Пусть $0 < \tilde{z} < z_0$ и $k_0 \geq 1$ таковы, что при $k \geq k_0$ имеем $z_k > \tilde{z}$. Выберем произвольные $\varepsilon > 0$ и $a > 0$ таким образом, чтобы $e^{-a} < \varepsilon$. Поскольку $\frac{\omega_{i_k}(z_k/2)}{z_k/2} \leq \frac{\omega_{i_k}(\tilde{z}/2)}{\tilde{z}/2}$ и $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\omega_{i_k}(\tilde{z}/2)}{\tilde{z}/2} = \frac{\psi(\tilde{z}/2)}{(\tilde{z}/2)}$, то существует константа $M > 0$ такая, что для всех $k \geq 1$ имеем

$$\frac{\omega_{i_k}(z_k/2)}{z_k/2} \leq M \quad \text{и} \quad \frac{\psi(z_k/2)}{z_k/2} \leq \frac{\psi(\tilde{z}/2)}{\tilde{z}/2} \leq M.$$

Тогда из (22) получаем ($k \geq k_0$)

$$r(\omega_{i_k}, \psi) \leq 2a \sup_{0 \leq x \leq 2a/\varepsilon} |W_{i_k}(t_j) - \psi(t_j)| + 2M\varepsilon, \quad (23)$$

откуда с учетом сделанного выше замечания о равномерной сходимости мер $W_{i_k}(t)$ и $\Psi(t)$, выводим $\lim_{k \rightarrow \infty} r(\omega_{i_k}, \psi) = 0$.

Таким образом, из поточечной сходимости последовательности $\{\omega_{i_k}(z), k \geq 1\}$ следует сходимость по метрике r . Обратное утверждение очевидно.

Покажем теперь, что \mathfrak{F} r -полно. Пусть $\{\psi_n(z) \in \mathfrak{F}, n \geq 1\}$ ($z > 0$) – произвольная сходящаяся последовательность, т. е. существует функция $\psi(z)$ такая, что $\lim_{n \rightarrow \infty} r(\psi_n, \psi) = 0$. По определению множества \mathfrak{F} и доказанному выше для

любого $n \geq 1$ существует последовательность $\{\omega_m^{(n)}(z) \in \mathfrak{R}, m \geq 1\}$ такая, что $\lim_{m \rightarrow \infty} r(\omega_m^{(n)}, \psi_n) = 0$. Но тогда нетрудно построить последовательность $\{\omega_{m_n}^{(n)}(z), n \geq 1\}$ такую, что

$$r(\omega_{m_n}^{(n)}, \psi_n) < \frac{1}{2^n}.$$

Отсюда следует: $\lim_{n \rightarrow \infty} r(\omega_{m_n}^{(n)}, \psi) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} r(\omega_{m_n}^{(n)}, \psi_n) + \lim_{n \rightarrow \infty} r(\psi_n, \psi)$, и значит $\psi(z) \in \mathfrak{F}$.

Пусть теперь $\{\psi_n(z) \in \mathfrak{F}, n \geq 1\}$ – произвольная фундаментальная последовательность. Аналогично доказательству того, что $\mathfrak{F} \neq \emptyset$, показывается существование последовательности $\{\psi_{i_k}(z), k \geq 1\}$ такой, что при $k \rightarrow \infty$ $\psi_{i_k}(z)$ поточечно сходится к некоторой функции $\psi(z)$ ($z > 0$). Отсюда совершенно так же, как и выше при выводе (23), доказывается, что $\lim_{k \rightarrow \infty} r(\psi_{i_k}, \psi) = 0$ и $\psi \in \mathfrak{F}$. Воспользовавшись неравенством $r(\psi_k, \psi) \leq r(\psi_{i_n}, \psi_k) + r(\psi_{i_n}, \psi)$ и фундаментальностью последовательности $\{\psi_k(z), n \geq 1\}$, выводим $\lim_{k \rightarrow \infty} r(\psi_k, \psi) = 0$.

Лемма 5. Множество \mathfrak{R} можно представить в виде $\mathfrak{R} = \bigcup_{k=1}^{\infty} \mathfrak{R}(\psi_k)$, где

$$\mathfrak{R}(\psi_i) \cap \mathfrak{R}(\psi_j) = \emptyset \text{ при } i \neq j.$$

Если $\mathfrak{R}(\psi_k) = \{\omega_{i_n}^{(k)}(z), n \geq 1\}$ ($k \geq 1$), то для любого $n \geq 0$ имеем $r(\omega_{i_n}^{(k)}, \psi_k) = \inf_{\psi \in \mathfrak{F}} r(\omega_{i_n}^{(k)}, \psi)$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} r(\omega_{i_n}^{(k)}, \psi_k) = 0$ равномерно по $k \geq 1$

и $\psi_k \in \mathfrak{R}(k \geq 1)$. Здесь при $|\mathfrak{R}(\psi_k)| < \infty$ полагаем $r(\omega_{i_n}^{(k)}, \psi_k) = 0$ для $n > |\mathfrak{R}(\psi_k)|$.

В частности, имеет место утверждение леммы 2 из [1].

Доказательство. Заметим, что для любых двух функций $\psi_i \in \mathfrak{R}(i=1,2)$ существует лишь конечное число точек z , $|1-z| \leq 1/2$ таких, что $\psi_1(z) = \psi_2(z)$. Предположим противное, т.е. существуют две различные функции $\psi_i(z) \in \mathfrak{R} (i=1,2)$ и последовательность различных точек $\{z_n, |1-z_n| \leq 1/2, n \geq 1\}$ такие, что для всех $n \geq 1$ имеем $\psi_1(z_n) = \psi_2(z_n)$. Без ограничения общности можно считать, что существует предел $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = z_0$ ($|1-z_0| \leq 1/2$). Имеем $\alpha(z) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\psi_1(z)}{z} - \frac{\psi_2(z)}{z} = 0$ при $z = z_n$ ($n \geq 1$). Но поскольку $\alpha(z)$ аналитична в области $\text{Re } z > 0$ как разность ПЛС некоторых мер, то необходимо $\alpha(z) \equiv 0$ в области $\text{Re } z > 0$. Полученное противоречие и доказывает справедливость сделанного выше замечания.

Выберем некоторую последовательность $\{z_n, n \geq 1\}$, $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = 1$. Тогда для любых двух функций $\psi_i(z) \in \mathfrak{R} (i=1,2)$ существует конечное число $m \geq 1$ такое, что $\psi_1(z_i) = \psi_2(z_i) (i = \overline{1, m-1})$, но либо $\psi_1(z_m) < \psi_2(z_m)$, либо $\psi_1(z_m) > \psi_2(z_m)$. Будем говорить, что функция $\psi_1(z)$ не превосходит функции $\psi_2(z)$ (записывается $\psi_1 < \psi_2$), если для некоторого числа $m \geq 1$ $\psi_1(z_i) = \psi_2(z_i) (i = \overline{1, m-1})$, но $\psi_1(z_m) < \psi_2(z_m)$. Нетрудно убедиться, что введенное соотношение превращает \mathfrak{R} во вполне упорядоченное множество.

Введенное бинарное отношение « $<$ » является транзитивным.

Действительно, пусть $\psi_1 < \psi_2$ и $\psi_2 < \psi_3$. Покажем, что $\psi_1 < \psi_3$.

Из определения отношения $\psi_1(z_{m_1}) < \psi_2(z_{m_1})$ следует существование чисел m_1 и m_2 таких, что $\psi_1(z_n) = \psi_2(z_n)$ при $n < m_1$, $\psi_1(z_{m_1}) < \psi_2(z_{m_1})$ и $\psi_2(z_n) = \psi_3(z_n)$ при $n < m_2$, $\psi_2(z_{m_2}) < \psi_3(z_{m_2})$. Пусть $m_1 \leq m_2$. Тогда имеем

$$\psi_1(z_{m_1}) < \psi_2(z_{m_1}) \leq \psi_3(z_{m_1}), \text{ т. е. } \psi_1(z_{m_1}) < \psi_3(z_{m_1}).$$

Аналогично при $m_1 > m_2$ имеем $\psi_1(z_{m_2}) = \psi_2(z_{m_2}) < \psi_3(z_{m_2})$. Таким образом, полагая $m = \min(m_1, m_2)$, получаем $\psi_1(z_n) = \psi_3(z_n)$ при $n < m$ и $\psi_1(z_m) < \psi_3(z_m)$, т.е. $\psi_1 < \psi_3$.

Отметим, что если последовательность $\{\psi_n \in \mathfrak{R}, n \geq 1\}$ такова, что $\lim_{n \rightarrow \infty} \psi_n(z) = \psi(z) (z > 0)$ и $\psi_i < \psi_j$ для всех $i \geq 1, j \geq 1, i < j$, то для любого $i \geq 1$ имеем $\psi_i < \psi$. Действительно, для любого $i \geq 1$ существует конечное число $m(i) \geq 1$ такое, что $\psi_i(z_n) < \psi(z_n) (n = \overline{1, m(i)-1})$, но

$\psi_i(z_{m(i)}) \neq \psi(z_{m(i)})$. Покажем, что тогда для всех $j \geq i$ имеем $\psi_j(z_n) < \psi(z_n)$ ($n = \overline{1, m(i)-1}$). Предположим противное. Тогда существует наименьшее число $i_1 > i$ такое, что $m(i_1) < m(i)$, и поэтому $\psi_i(z_n) = \psi(z_n)$ для всех $n \leq m(i_1)$. Так как $\psi_i(z_n) = \psi_{i_1}(z_n) = \psi(z_n)$ для всех $n < m(i_1)$ и $\psi_i \prec \psi_{i_1}$, то отсюда следует

$$\psi(z_{m(i_1)}) = \psi_i(z_{m(i_1)}) < \psi_{i_1}(z_{m(i_1)}). \quad (24)$$

Из вышесказанного вытекает существование (наименьшего) числа $i_2 > i_1$ такого, что $m(i_2) < m(i_1)$, так как в противном случае (т. е. при $m(k) \geq m(i_1)$ для всех $k > i_1$) ввиду $\psi_{i_1} \prec \psi_k$ имеем $\psi_{i_1}(z_n) = \psi_k(z_n)$ для всех $n < m(i)$ и

$$\psi_{i_1}(z_{m(i_1)}) \leq \psi_k(z_{m(i_1)}). \quad (25)$$

Поскольку $\lim_{k \rightarrow \infty} \psi_k(z_{m(i_1)}) = \psi(z_{m(i_1)})$, то ввиду (24) соотношение (25) не может иметь места для всех $k > i_1$ – противоречие со сделанным выше предположением.

Проделав описанную выше процедуру не более чем $m(i)$ раз, придем к следующему: существует число $i_0 > i$ такое, что для всех $k > i_0$ имеем $m(k) \geq m(i_0)$, но $m(i_0) < m(i)$. Но тогда аналогично (24) и (25) для всех $j > i_0$ выводим

$$\psi(z_{m(i_0)}) = \psi_i(z_{m(i_0)}) < \psi_{i_0}(z_{m(i_0)}) \leq \psi_k(z_{m(i_0)})$$

– противоречие с определением $m(i)$.

Таким образом, для всех $j \geq i$ имеем $\psi_j(z_n) = \psi(z_n)$ ($n = \overline{1, m(i)-1}$), откуда ввиду $\psi_j \prec \psi_k$ при $i \leq j < k$ выводим $\psi_j(z_{m(i)}) \leq \psi_k(z_{m(i)})$. Но поскольку $\psi_i(z_{m(i)}) \neq \psi(z_{m(i)})$ и $\psi_i \prec \psi_k$ для $k > i$, то существует число $j > i$ такое, что $\psi_i(z_{m(i)}) < \psi_j(z_{m(i)})$, так как в противном случае (т. е. при $\psi_i(z_{m(i)}) = \psi_k(z_{m(i)})$ для всех $k > i$) получаем $\psi_i(z_{m(i)}) = \lim_{k \rightarrow \infty} \psi_k(z_{m(i)}) = \psi(z_{m(i)})$ – противоречие с определением $m(i)$. Отсюда следует

$$\psi_i(z_{m(i)}) < \psi_j(z_{m(i)}) \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \psi_k(z_{m(i)}) = \psi(z_{m(i)}),$$

и значит $\psi_i \prec \psi$.

Для любой функции $\alpha(z)$ ($z > 0$) положим $r(\alpha, \mathfrak{F}) = \inf_{\psi \in \mathfrak{F}} r(\alpha, \psi)$.

Пусть $\psi \in \mathfrak{F}$. Построим множество $\mathfrak{R}(\psi)$ следующим образом: $\mathfrak{R}(\psi) = \{\omega_n \in \mathfrak{R} : r(\omega_n, \mathfrak{F}) = r(\omega_n, \psi)\}$, но не существует $\psi' \in \mathfrak{F}$, $\psi' \prec \psi$ такого,

что $r(\omega_n, \mathfrak{T}) = r(\omega_n, \psi')$. Обозначим через \mathfrak{T}_1 множество тех функций $\psi \in \mathfrak{T}$, для которых $\mathfrak{R}(\psi) \neq \emptyset$.

Докажем, что тогда $\mathfrak{R} = \bigcup_{\psi \in \mathfrak{T}_1} \mathfrak{R}(\psi)$, причем $\mathfrak{R}(\psi_1) \cap \mathfrak{R}(\psi_2) = \emptyset$ при

$\psi_1 \neq \psi_2$. Покажем вначале, что для любого $n \geq 1$ существует $\psi \in \mathfrak{T}$ такое, что $r(\omega_n, \mathfrak{T}) = r(\omega_n, \psi)$. Построим последовательность $\{\psi_n \in \mathfrak{T}, n \geq 1\}$ следующим образом: выберем $\psi_k \in \mathfrak{T}$ так, чтобы $r(\omega_n, \psi_k) - r(\omega_n, \mathfrak{T}) < 1/k$ ($k \geq 1$). В силу леммы 4 существуют подпоследовательность $\{\psi_{j_k}(z), k \geq 1\}$ и функция $\psi \in \mathfrak{T}$ такие, что $\lim_{n \rightarrow \infty} r(\psi_{i_k}, \psi) = 0$. Но тогда для любого $k \geq 1$ имеем

$$r(\omega_n, \mathfrak{T}) \leq r(\omega_n, \psi) \leq r(\omega_n, \psi_{i_k}) + r(\psi_{i_k}, \psi) \leq r(\omega_n, \mathfrak{T}) + i_k^{-1} + r(\psi_{i_k}, \psi),$$

откуда после перехода к пределу при $k \rightarrow \infty$ получаем $r(\omega_n, \mathfrak{T}) = r(\omega_n, \psi)$.

Положим $\Omega = \Omega_n \stackrel{def}{=} \{\psi \in \mathfrak{T} : r(\omega_n, \mathfrak{T}) = r(\omega_n, \psi)\}$. Покажем, что Ω замкнуто относительно сходимости по метрике r . Предположим, что последовательность $\{\psi_n \in \mathfrak{T}, n \geq 1\}$ сходится по метрике r к некоторой функции $\psi \in \mathfrak{T}$, т. е. $\lim_{n \rightarrow \infty} r(\psi_k, \psi) = 0$. Тогда имеем

$$r(\omega_n, \psi) \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \{r(\omega_n, \psi_k) + r(\psi_k, \psi)\} = r(\omega_n, \mathfrak{T}),$$

откуда следует, что $r(\omega_n, \psi) = r(\omega_n, \mathfrak{T})$ и $\psi \in \mathfrak{T}$.

Покажем, что существует $\psi \in \Omega$ такое, что для любого $\psi' \in \Omega$, $\psi' \neq \psi$ имеем $\psi' \prec \psi$.

Если Ω содержит лишь конечное число элементов, то этот факт очевиден. Возьмем произвольную цепь $\{\psi_k \in \Omega, k \geq 1\}$, т. е. необходимо $\psi_1 \prec \psi_2 \prec \dots \prec \psi_k \prec \dots$. В силу леммы 4 существуют подпоследовательность $\{\psi_k, k \geq 1\}$ и функция $\psi \in \Omega$ такие, что $\lim_{n \rightarrow \infty} r(\psi_k, \psi) = 0$. Но тогда, как показано выше, $\psi_{i_k} \prec \psi$ для любого $k \geq 1$. Отсюда для любого $m \geq 1$, выбирая $i_k > m$, получаем $\psi_m \prec \psi_{i_k} \prec \psi$, т. е. $\psi_m \prec \psi$ для всех $m \geq 1$. Таким образом, мы показали, что всякая цепь из Ω имеет верхнюю грань. Отсюда на основе леммы Цорна заключаем, что в Ω существует максимальный элемент $\psi \in \Omega$, т. е. для всех $\psi' \in \Omega$, $\psi' \neq \psi$ имеем $\psi' \prec \psi$. Из вышесказанного в силу определения $\mathfrak{R}(\psi)$ заключаем, что

$$r(\omega_n, \psi) = \lim_{k \rightarrow \infty} r(\omega_n, \psi_k) = \lim_{k \rightarrow \infty} r(\omega_n, \mathfrak{T}) = r(\omega_n, \mathfrak{T}),$$

и, следовательно, $\omega_n \in \mathfrak{R}(\psi)$. Заметим, что так как \mathfrak{T} – вполне упорядоченное множество, то в \mathfrak{T} не существует двух различных функций $\psi_i \in \mathfrak{T}$ ($i = 1, 2$) таких, что $\omega_n \in \mathfrak{R}(\psi_i)$ ($i = 1, 2$).

Указанное свойство определяет разбиение множества $\mathfrak{R} = \bigcup_{\psi \in \mathfrak{T}} \mathfrak{R}(\psi)$, причем $\mathfrak{R}(\psi_1) \cap \mathfrak{R}(\psi_2) = \emptyset$, если $\psi_1 \neq \psi_2$. Но поскольку множество \mathfrak{R} счетно, то \mathfrak{T}_1 также не более чем счетно, и все функции, входящие в \mathfrak{T}_1 , могут быть пронумерованы, т. е. $\mathfrak{T}_1 = \{\psi_k, k = \overline{1, N}, N \leq \infty\}$. Поэтому последнее разбиение эквивалентно следующему: $\mathfrak{R} = \bigcup_{k=1}^N \mathfrak{R}(\psi_k)$, где $\mathfrak{R}(\psi_n) \neq \emptyset$ ($1 \leq n \leq N$), $\mathfrak{R}(\psi_i) \cap \mathfrak{R}(\psi_j) = \emptyset$ если $i \neq j$.

Первое утверждение леммы 5 доказано.

Пусть $\mathfrak{R}(\psi_k) = \{\omega_{i_n}^{(k)}(z), 1 \leq n \leq N_k\}$ ($1 \leq k \leq N, z > 0, 1 \leq N_k \leq \infty$). Покажем, что если $\mathfrak{R}(\psi_k)$ для некоторого k содержит бесконечное множество элементов, то $\lim_{n \rightarrow \infty} r(\omega_{i_n}^{(k)}, \psi_k) = 0$. Предположим, что подпоследовательность $\{\omega_{i_m}^{(k)}(z) \in \mathfrak{R}(\psi_k), m \geq 1\}$ и функция $\psi \in \mathfrak{T}$ таковы, что $\lim_{m \rightarrow \infty} r(\omega_{i_m}^{(k)}, \psi) = 0$. В силу определения множества $\mathfrak{R}(\psi_k)$ имеем

$$r(\omega_{i_m}^{(k)}, \psi_k) = \inf_{\psi' \in \mathfrak{T}} r(\omega_{i_m}^{(k)}, \psi') \leq r(\omega_{i_m}^{(k)}, \psi),$$

откуда следует $\lim_{m \rightarrow \infty} r(\omega_{i_m}^{(k)}, \psi_k) = 0$. Значит, $\psi = \psi_k$.

Таким образом, $\mathfrak{R}(\psi_k)$ имеет единственную предельную точку ψ_k и $\lim_{n \rightarrow \infty} r(\omega_{i_n}^{(k)}, \psi_k) = 0$.

Наконец, покажем, что $\lim_{n \rightarrow \infty} r(\omega_{i_n}^{(k)}, \psi_k) = 0$ равномерно по $k \geq 1$. Предположим противное. Тогда существует $\varepsilon > 0$ такое, что для любого $n \geq 1$ существуют $M = M(n) > n$ и $k = k(n)$ такие, что $r(\omega_{i_M}^{(k)}, \psi_k) > \varepsilon$. Но совершенно так же, как и при доказательстве леммы 4, показывается, что из подпоследовательности $\{\omega_{i_{M(n)}}^{(k(n))}(z), n \geq 1\}$ ($z > 0$) можно выбрать сходящуюся подпоследовательность $\{\omega_{j_m}^{(k)}(z), m \geq 1\}$, т. е. существует функция $\psi \in \mathfrak{T}$ такая, что $\lim_{m \rightarrow \infty} r(\omega_{j_m}^{(k)}, \psi) = 0$ – противоречие с определением $\mathfrak{R}(\psi_k)$ и неравенством $r(\omega_{i_M}^{(k)}, \psi_k) > \varepsilon$.

Утверждение леммы 2 из [1] является частью утверждения леммы 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование аппарата редких восстанавливаемых событий для анализа характеристик информационной безопасности представляет новый подход к изучению систем обеспечения информационной безопасности. Ранее с участием одного из авторов была проведена формализация всех условий и ограничений в модели восстановления с редкими событиями. Полученные условия достаточно сложны. В работе проведено определенное упрощение этих условий. Приведены альтернативные постановки ограничений, которые более понятны и прозрачны для понимания; доказана их эквивалентность исходным характеристикам; доказана полнота и замкнутость класса моделей, удовлетворяющих введенным ограничениям. Полученные результаты являются основой для оценки основных характеристики системы информационной безопасности: вероятности совершения злоумышленной атаки и времени до момента начала ближайшей из атак.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Г.А., Попов А.Г., Лантев П.В. Формализация процесса изменения вероятности нарушения сервисов информационной безопасности на основе аппарата редких событий // Наука, образование, инновации: пути развития: материалы восьмой Всероссийской научно-практической конференции (23–25 мая 2017 г.). – Петропавловск-Камчатский, 2017. – С. 29–34.
2. Гнеденко Д.Б., Соловьев А.Д. Одна общая модель резервирования с восстановлением // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1974. – № 6. – С. 113–119.
3. Некоторые вопросы надежности / под ред. В.В. Каштанова. – М.: Радио и связь, 1979. – 126 с.
4. Гнеденко Д.Б., Соловьев А.Д. Асимптотическая оценка надежности сложных систем с быстрым восстановлением // Труды III Всесоюзной школы-совещания по теории массового обслуживания. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. – Т. 1. – С. 185–197.
5. Соловьев А.Д. Асимптотическое поведение момента первого наступления редкого события в регенерирующем процессе // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1971. – № 6. – С. 79–90.
6. Шилов Г.Е. Математический анализ. Специальный курс. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 436 с.
7. Попов Г.А. Асимптотическое поведение момента первого наступления редкого события в неоднородном регенерирующем процессе. – М., 2000. – 46 с. – Деп. в ВИНТИ № 2193-В00.
8. Шевченко Е.Н. Математическое моделирование распределения риска при независимых случайных величинах вероятностей исходных событий и ущерба // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 12-3. – С. 604–608.
9. Рогатин А.Д. Оценка вероятности редких событий в поведении толпы // Управление большими системами. – 2016. – № 63. – С. 106–128.
10. Ташевский А.Г. Моделирование редких событий при прогнозировании эксплуатационных процессов в сложных системах машиностроения // Инструмент и технологии. – 2011. – № 32. – С. 22–33.
11. Граничин О.Н., Сысоев С.С., Чуйко Д.С. Проблемы тестирования сервера как задачи о моделировании редких событий // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2005. – Т. 1, № 1-1. – С. 48–72.
12. Агалаков Ю.Г. Оценивание вероятностей редких событий в вычислительных экспериментах с имитационными моделями // Управление большими системами. – 2012. – № 40. – С. 83–95.
13. Русинов М.А. Об основных принципах методики анализа редких событий в дискретных сложных системах // Вестник МГТУ Станкин. – 2015. – № 3 (34). – С. 139–144.
14. King G., Zeng L. Logistic regression in rare events data // *Political Analysis*. – 2001. – Vol. 9. – P. 137–163.

15. Data Mining: Классификация редких событий [Электронный ресурс]. – URL: <http://docplayer.ru/45110849-Data-mining-klassifikaciya-redkih-sobytyiy.html> (дата обращения: 16.06.2019).

16. Уколов А.И., Гупалова Т.Н. Управление корпоративными рисками: инструменты хеджирования. – М.: Директ-Медиа, 2014. – 273 с.

17. Математическое моделирование потоков автотранспорта на основе макро- и микро-скопических подходов / М.А. Трапезников, А.А. Чечина, Н.Г. Чурбанова, Д.Б. Поляков // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – № 1. – С. 130–139.

Попов Георгий Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование систем, информационная безопасность, системный анализ. Имеет более 150 публикаций, в том числе две монографии. E-mail: popov@astu.org

Попова Екатерина Александровна, старший преподаватель кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системный анализ, математическое моделирование. Имеет более 20 публикаций. E-mail: e.popova@astu.org

Васильева Ольга Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системный анализ, математическое моделирование. Имеет 15 публикаций. E-mail: vasilyevaov26@gmail.com

Popov Georgy Alexandrovich, D.Sc. (Eng.), professor, Department of Information Security, Astrakhan State Technical University. The main field of his research covers mathematical modeling of systems, information security and systems analysis. He is the author of over 150 publications including 2 monographs. E-mail: popov@astu.org

Popova Ekaterina Alexandrovna, assistant professor, Department of Information Security, Astrakhan State Technical University. The main field of her research includes mathematical modeling and systems analysis. She is the author of over 20 publications. E-mail: e.popova@astu.org

Vasilieva Olga Valerievna, PhD (Eng.), associate professor, Department of Information Security, Astrakhan State Technical University. The main field of her research covers mathematical modeling and systems analysis. She is the author of 15 publications E-mail: vasilyevaov26@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-69-88

Analysis of input conditions in the information security model based on the rare event apparatus*

G.A. POPOV^a, E.A. POPOVA^b, O.V. VASILIEVA^c

Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, Russian Federation

^a popov@astu.org ^b e.popova@astu.org ^c vasilyevaov26@gmail.com

Abstract

The task of estimating the probability of a malicious attack is considered under conditions when the initial process of ensuring information security is regenerative. Of particular interest is the analysis of the likelihood and a possible moment of a malicious attack. This probability is usually very small, which allows us to speak of the probability of a

* Received 01 February 2019.

successful attack as a rare event. Then the moment of successful realization of this attack within the framework of the systems being restored can be considered as the moment of the first occurrence of a certain event (a rare event). The moments of regeneration of the considered restoration process can be the moments of carrying out preventive and testing activities. Thus, it is assumed that the probability of a malicious action is small, and the original process is regenerating. The formalization of initial conditions, which are necessary for the subsequent study of this probability based on the methods of mathematical and computer modeling, has been carried out. Since the processes of malicious attack flows and flows of countermeasures in this formulation are heterogeneous, normalizing functions to compare these flows are introduced. For the indicated normalizing functions, limiting relations are obtained, which are exponential relations. Alternative formulations of the initial conditions are given, and their equivalence with the initial conditions is proved. It is shown that when the above conditions are fulfilled, the processes of incoming attacks and counteraction to them can be divided into separate groups, each of which has the property of asymptotic convergence, that is, it can be considered as incomes of the same source for this group. The obtained ratios can be used for splitting attacks into individual sources of attacks.

Keywords: malicious action, non-uniform regenerating process, flow of malicious attacks, probability of a malicious attack, flow of countermeasures, a rare event, the time before an attack, normalization functions, limit ratios, splitting of the incoming flow into sources

REFERENCES

1. Popov G.A., Popov A.G., Laptev P.V. [Formalization of the process of changing the probability of violation of information security services based on the apparatus of rare events]. *Nauka, obrazovanie, innovatsii: puti razvitiya: materialy vos'moi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science, Education, Innovations: Ways of Development: materials of the eighth All-Russian Scientific-Practical Conference], 23–25 May 2017. Petropavlovsk-Kamchatskii, 2017, pp. 29–34. (In Russian).
2. Gnedenko D.B., Solov'ev A.D. Odnа obshchaya model' rezervirovaniya s vosstanovleniem [One common backup model with recovery]. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1974, no. 6, pp. 113–119. (In Russian).
3. Kashtanov V.V., ed. *Nekotorye voprosy nadezhnosti* [Some issues of reliability]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1979. 126 p.
4. Gnedenko D.B., Solov'ev A.D. [Asymptotic estimation of reliability of complex systems with fast recovery]. *Trudy III Vsesoyuznoi shkoly-soveshchaniya po teorii massovogo obsluzhivaniya* [Proceedings of the III All-Union School-Meeting on Queuing Theory]. Moscow, MSU Publ., 1975, pp. 185–197. (In Russian).
5. Solov'ev A.D. [Asymptotic behavior of the moment of the first occurrence of a rare event in the regenerating process]. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1971, no. 6, pp. 79–90. (In Russian).
6. Shilov G.E. *Matematicheskii analiz. Spetsial'nyi kurs* [Mathematical analysis. Special course]. Moscow, GIFML Publ., 1961. 436 p.
7. Popov G.A. Asymptotic behavior of the moment of the first occurrence of a rare event in an inhomogeneous regenerating process. Moscow, 2000. 46 p. Available from VINITI, no. 2193-V00.
8. Shevchenko E.N. Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya riska pri nezavisimykh sluchainykh velichinakh veroyatnostei iskhodnykh sobytii i ushcherba [Mathematical modeling of risk distribution with independent random values of the probabilities of initial events and damage]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2011, no. 12-3, pp. 604–608.
9. Rogatin A.D. Otsenka veroyatnosti redkikh sobytii v povedenii tolpy [Estimation of the probability of rare events in crowd behavior]. *Upravlenie bol'shimi sistemami – Large-scale Systems Control*, 2016, no. 63, pp. 106–128.
10. Tashevskii A.G. Modelirovanie redkikh sobytii pri prognozirovanii ekspluatatsionnykh protsessov v slozhnykh sistemakh mashinostroeniya [Modeling of rare events in forecasting operational processes in complex engineering systems]. *Instrument i tekhnologii*, 2011, no. 32, pp. 22–33. (In Russian).
11. Granichin O.N., Sysoev S.S., Chuiko D.S. Problemy testirovaniya servera kak zadachi o modelirovanii redkikh sobytii [Problems of testing the server as problems on the modeling of rare

events]. *Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike – Stochastic Optimization in Informatics*, 2005, vol. 1, no. 1-1, pp. 48–72.

12. Agalakov Yu.G. Otsenivanie veroyatnostei redkikh sobytii v vychislitel'nykh eksperimentakh s imitatsionnymi modelyami [Estimation of probabilities of rare events in computational experiments with simulation models]. *Upravlenie bol'shimi sistemami – Large-scale Systems Control*, 2012, no. 40, pp. 83–95.

13. Rusinov M.A. Ob osnovnykh printsipakh metodiki analiza redkikh sobytii v diskretnykh slozhnykh sistemakh [On the basic principles of the method of analysis of rare events in discrete complex systems]. *Vestnik MGTU Stankin – Vestnik MSTU “Stankin”*, 2015, no. 3 (34), pp. 139–144.

14. King G., Zeng L. Logistic regression in rare events data. *Political Analysis*, 2001, vol. 9, pp. 137–163.

15. *Data Mining: Klassifikatsiya redkikh sobytii* [Data Mining: Classification of rare events]. Available at: <http://docplayer.ru/45110849-Data-mining-klassifikatsiya-redkikh-sobytyiy.html> (accessed 16.06.2019).

16. Ukolov A.I., Gupalova T.N. *Upravlenie korporativnymi riskami: instrumenty khedzhirovaniya* [Corporate risk management: hedging tools]. Moscow, Direkt-Media Publ., 2014. 273 p.

17. Trapeznikov M.A., Chechina A.A., Churbanova N.G., Poljakov D.B. *Matematicheskoe modelirovanie potokov avtotransporta na osnove makro- i mikro-skopicheskikh podkhodov* [Mathematical modeling of traffic flows on the basis of macro- and microscopic approaches]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2014, no. 1, pp. 130–139.

Для цитирования:

Попов Г.А., Попова Е.А., Васильева О.В. Анализ входных условий в модели информационной безопасности, построенной на основе аппарата редких событий // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 69–88. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-69-88.

For citation:

Popov G.A., Popova E.A., Vasilieva O.V. Analiz vkhodnykh uslovii v modeli informatsionnoi bezopasnosti, postroennoi na osnove apparata redkikh sobytii [Analysis of the input conditions in the information security model built on the basis of the apparatus of rare events]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 69–88. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-69-88.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.932.4

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-89-100

Разработка модели субпиксельной обработки аэрокосмических снимков при дистанционном зондировании Земли*

Д.В. ФЕТИСОВ¹, А.Н. КОЛЕСЕНКОВ², С.И. БАБАЕВ³,
Т.А. ФЕТИСОВА⁴

390005, РФ, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, Рязанский государственный радиотехнический университет

^a morzitko@gmail.com ^b sk62@mail.ru ^c babaev.s.i@gmail.com

^d pyurova_ta@mail.ru

Цифровая обработка широко используется в промышленности, образовании и космосе, которые работают с изображениями высокого разрешения. При дистанционном зондировании земной поверхности для исследования недр и полезных ископаемых необходимы изображения высокого разрешения. Однако снимки, получаемые со спутников и с помощью аэрофотосъемки, не всегда обладают достаточным качеством, вследствие чего их подвергают дополнительной компьютерной обработке. Поэтому разработка модели субпиксельной обработки аэрокосмических снимков для последующего повышения их качества является актуальной задачей для теоретических исследований и решения различных прикладных задач.

Космическая фотосъемка является важной составляющей для получения фотоснимков местности и ее последующего анализа. Она может проводиться различными способами: через одиночную или прицельную, маршрутную или глобальную съемку, каждая из которых обладает своим преимуществом. Также космическая съемка различается относительно масштаба, обзорности, пространственного разрешения и спектральных характеристик.

Для повышения качества получаемых снимков имеется 3 группы методов: линейные, нелинейные методы и суперразрешение. Последний метод также называется сканированием, под которым понимается обработка нескольких снимков низкого разрешения, сдвинутых относительно друг друга на часть пикселя. Для того чтобы повысить качество изображения с помощью метода субпиксельной обработки, и была разработана модель, подразумевающая преобразование исходного «непрерывного» снимка в «дискретный» (в виде матрицы) через функции рассеяния точки.

Таким образом, в данной статье проанализированы способы получения космических снимков земной поверхности, рассмотрены методы повышения их качества, а также разработана модель субпиксельной обработки аэрокосмических изображений при дистанционном зондировании Земли, что позволит проводить исследования и мониторинг полезных ископаемых и состояния недр земли.

Ключевые слова: изображение, суперразрешение, модель, сканирование, субпиксельная обработка, метод, дистанционное зондирование Земли, космический снимок

* Статья получена 24 декабря 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день широкое распространение получили технологии, которые связаны с применением высококачественных цифровых изображений. Они используются в медицине, образовании, промышленности, космических исследованиях. Подобные науки и дисциплины, занимающиеся вопросами обработки изображений с низким разрешением, приобрели особую актуальность в настоящее время. Ранее основные разработки преимущественно проводились зарубежными учеными, однако российские исследования в последние годы также стали активно развиваться в данном направлении.

Алгоритмы и методы повышения качества цифровых изображений и снимков, полученных с помощью аэрофотосъемки, условно можно разделить на три группы: нелинейные методы, линейные методы, методы суперразрешения [1]. Но, несмотря на большое внимание, уделенное данным методам в современной научной литературе, и на стремительное развитие данной тематики, связанной с цифровой обработкой изображений, необходимо постоянно проводить анализ существующих, а также усовершенствованных методов повышения разрешения изображений [2, 3].

В связи с этим цель данной работы состоит в изучении процесса улучшения качества цифровых изображений современными методами обработки, их анализе, а также в разработке общей модели обработки снимков, полученных со спутников для проведения дальнейших исследований в рамках дистанционного зондирования Земли.

1. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СНИМКОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Космическая фотосъемка представляет собой технологический процесс представления земной поверхности в виде фотографических изображений с некоторого летательного аппарата для получения фотоснимков местности [4] с заданными характеристиками и параметрами. К главным задачам аэрокосмических съемок можно отнести:

- изучение планет Солнечной системы;
- исследование и рациональное использование полезных ископаемых и природных ресурсов Земли;
- исследование антропогенных изменений поверхности;
- изучение Мирового океана;
- исследование загрязнения воздушного и водного пространства;
- мониторинг окружающей среды;
- изучение прибрежных частей суши и акваторий шельфов.

Основным отличием фотоснимков из космоса является скорость полета и большая высота, а также их периодическое изменение во время движения космического летательного аппарата по орбите; постоянное вращение Земли и объектов съемки относительно орбиты; изменение освещенности Земли по траектории полета летательного аппарата; фотографирование сквозь слой атмосферы; аппаратура для фотографирования полностью автоматизирована [5, 6].

Высота съемки способствует уменьшению масштаба снимка, однако ее выбор определяется поставленными при съемке задачами и необходимостью получения снимков определенного масштаба. Вследствие этого требования к оптической системе фотоаппаратов повышаются с точки зрения качества, которое должно быть хорошим или приемлемым по всему полю. К геометрическим искажениям предъявляются особенно высокие требования.

Преимущество и значимость снимков Земли из космоса бесспорны по сравнению с обычными воздушными снимками [7]. Прежде всего они отличаются своей обзорностью, благодаря которой позволяют делать съемку с охватом территории в сотни и тысячи километров. Также они обладают свойствами пространственной и спектральной генерализации (отсеивание случайного и второстепенного и выделение главного и существенного). Съемка из космоса позволяет получать фотоснимки через регулярные промежутки времени, а это, в свою очередь, способствует проведению качественных исследований динамики любого процесса [8].

Космическая съемка может проводиться разными методами. Относительно способа отображения земной поверхности на космических снимках обычно выделяют следующие виды съемки:

- одиночное фотографирование;
- прицельная;
- маршрутная;
- глобальная.

Под одиночной или выборочной съемкой подразумевается фотографирование ручными камерами самими космонавтами. В таких случаях снимки получаются перспективными со значительными углами наклона.

Прицельное фотографирование предназначено для получения изображений специально заданных участков Земли в стороне от трассы.

При маршрутной съемке фотографирование земной поверхности производится вдоль маршрута полета спутника, при этом ширина полосы/зоны съемки зависит от угла обзора и высоты полета съемочной системы. Для того чтобы увеличить полосу обзора, обычно практикуют «веерную» съемку, т. е. поперек направления полета двумя или тремя фотосистемами высокого разрешения.

Глобальная съемка – это съемка с полярно-орбитальных и геостационарных спутников. Четыре-пять спутников на экваториальной орбите обеспечивают непрерывное получение обзорных снимков всей Земли мелкого масштаба (космическое патрулирование) за исключением полярных шапок.

Под аэрокосмическим снимком [9, 10] в подобных случаях понимают двумерное изображение реальных объектов, полученное по определенным радиометрическим (фотометрическим) и геометрическим законам с помощью дистанционной регистрации яркости объектов и предназначенное для изучения видимых и скрытых объектов, процессов и явлений окружающего мира, для определения их положения на земной поверхности.

По своим геометрическим свойствам космический снимок принципиально не отличается от аэрофотоснимка, однако имеет особенности, которые связаны с фотографированием с большой высоты и скоростью движения. Ввиду того, что по сравнению с самолетом спутник движется гораздо быстрее, то требуются короткие выдержки при съемке.

Космическая съемка также классифицируется по следующим параметрам:

- пространственному разрешению;
- масштабам;
- обзорности;
- спектральным характеристикам.

Данные параметры определяют способность дешифровать различные объекты на космических снимках и с их помощью решать геологические задачи [11].

Различные по своему назначению спутники с разными съемочными системами для выполнения съемок запускаются в настоящее время. Из систем, которые предназначены для космических съемок, наиболее перспективными признаются радиолокаторы с синтезированной длиной антенны и многозональные оптико-электронные стереосканеры.

Относительно технологии съемки и используемого спектрального диапазона выделяют сканерную (оптико-электронного и оптико-механического сканирования) и фотографическую (черно-белую, цветную, спектрально-зональную) съемки в инфракрасном диапазоне, микроволновую радиометрическую и радиолокационную съемку, а также тепловую инфракрасную съемку.

В современном дистанционном зондировании Земли стал основным многозональный принцип. Такая съемка выполняется одновременно в трех-семи узких спектральных зонах инфракрасного и видимого диапазона и сочетается со съемкой в панхроматической зоне, чтобы получить изображения более высокого пространственного разрешения. Сканеры, основанные на ПЗС-матрицах, позволяют увеличить количество спектральных зон до нескольких сотен – это гиперспектральная съемка. Также существует многочастотная съемка, при которой реализуется многозональный принцип через использование нескольких частот (длин радиоволн) СВЧ-диапазона, и поляризационная съемка с разной поляризацией зондирующего излучения.

Детальные стереоскопические снимки, которые получают с космических высот с помощью оптико-электронных длиннофокусных сканеров, оказались приемлемыми для метрической характеристики рельефа поверхности Земли в виде цифровых моделей и изолинейных картин рельефа. Такая стереоскопическая съемка может быть представлена несколькими вариантами: одновитковая или однопроходная съемка (перекрывающиеся стереопары снимков получают относительно оптической оси, вращающейся в разных направлениях); двухвитковая съемка (получают снимки с поперечным перекрытием относительно соседних витков в результате отклонения оптической оси в сторону).

2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В настоящее время все методы улучшения качества цифровых изображений [12] можно разделить на линейные, нелинейные и суперразрешение. К первым методам (линейным) относится процедура интерполяции, являющейся самым простейшим способом повышения разрешения. При данном подходе интерполяция снимка представляется в виде функции, а пиксели – в виде точек, причем значения интерполирующей функции в них заранее из-

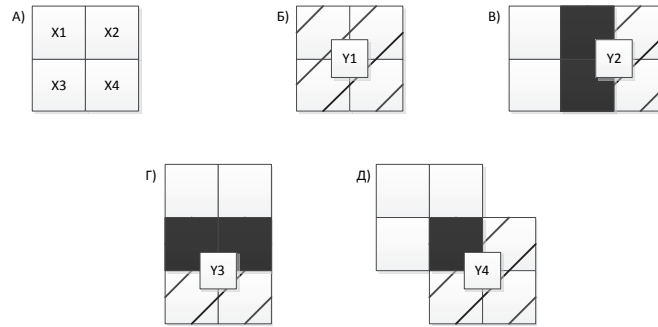
вестны. Под интерполяцией понимается процесс нахождения промежуточных значений относительно уже известных значений, составляющих дискретный набор, поэтому процедура интерполирования никогда не позволит точно восстановить информацию.

Методы интерполяции основаны на применении свертки изображения и ядер различных типов. Простейшим и самым быстрым линейным методом, основанным на процедуре интерполяции, является метод «ближайшего соседа», заключающийся в растяжении пикселей. Например, данное растяжение будет реализовано через дублирование пикселей изображения, если при ресамплинге используется целый коэффициент увеличения. Главным недостатком применения методов интерполяции является явно выраженный эффект ступенчатости.

Ко второй группе методов повышения разрешения изображений относятся нелинейные методы. Они позволяют избавиться от недостатков методов первой группы путем применения адаптивных методов. В них ядро задается пикселями, независимыми друг от друга. Примером нелинейных методов могут служить градиентные алгоритмы, которые позволяют достигнуть более качественных результатов при интерполяции относительно границ частей снимка. Здесь используются разные ядра поперек и вдоль контуров изображения (например, применяется функция Гаусса с переменными радиусами разных направлений). Благодаря интерполированию границ результат получается достаточно схожим с результатами бикубической интерполяции, однако эффект наложения оказывается почти полностью подавленным.

Суперразрешение составляет третью группу методов повышения качества изображения. Под суперразрешением понимают построение изображения очень высокого разрешения по нескольким изображениям низкого разрешения, слабо отличающимся друг от друга. Главная идея заключается в применении субпиксельных сдвигов снимков исследуемого объекта для разных комбинаций информации с нескольких изображений, полученных в результате аэрофотосъемки. Обычно в литературе для восстановления изображения высокого разрешения путем субпиксельной обработки сдвинутых снимков низкого разрешения употребляют термин «сканирование» [13]. При этом пиксели имеют конечный размер, их сигналы соответствуют усредненным значениям некоторой окрестности точки, а не значениям яркости объекта в определенной точке на исходном изображении. При смещении снимков на долю или часть пикселя усреднение производится в разных кадрах по разным окрестностям.

На рисунке упрощенно изображен процесс улучшения качества в случае с использованием четырех снимков, которые сдвинуты на половину пикселя по двум направлениям (например, А – изображение высокого разрешения, состоящее из четырех пикселей X_i , где i – номер пикселя; Б–Д – снимки низкого разрешения, состоящие из одного пикселя, полученные при субпиксельном сдвиге камеры в разных направлениях; пиксель изображения низкого разрешения обозначен как Y_j , где j – номер кадра при сканировании). Для нахождения значений пикселей результирующего изображения высокого разрешения требуются данные о значениях точек на граничной области, захватываемой кадром низкого разрешения при его сдвиге относительно исходного положения.



Варианты метода суперразрешения

Versions of the super-resolution method

Методы суперразрешения также делятся на два типа: методы, основанные на обучении, и методы, основанные на восстановлении изображения [2, 14]. Первые методы используют один снимок низкого разрешения и обновляемую базу данных, вторые – несколько снимков низкого разрешения. Обучающие методы являются перспективными, но не являются универсальными (например, их невозможно использовать для восстановления инфракрасных изображений).

Восстанавливающие методы для получения изображений высокого разрешения [3, 15] можно разделить на алгоритмы, использующие одномерное сканирование, и алгоритмы, использующие двумерное сканирование. Особого внимания заслуживают методы одномерного сканирования, поскольку они не так сложны в реализации и быстро приводят к желаемому результату.

В целом субпиксельная обработка как процедура получения суперразрешения сводится к минимизации отклонения восстановленного изображения от изображения реального объекта.

3. ОБЩАЯ МОДЕЛЬ СУБПИКСЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Свет в плоскости получения изображения распространяется непрерывно, поэтому процесс описания модели следует начать с непрерывного формирования снимка. Для этого используется функция рассеяния точки, которая позволяет моделировать усреднения и искажения в момент фиксации изображения.

Для получения сверхразрешения необходимо использовать несколько снимков. Пусть $I_k(pix)$ – это исходное непрерывное изображение низкого разрешения, состоящее из номеров пикселей (pix) низкого разрешения. Для его получения через фотокамеру происходит следующее:

$$I_k(pix) = (F_k PSF_k) pix, \quad (1)$$

где F_k – исходное изображение в камере, PSF_k – функция рассеяния точки. Иначе формулу (1) можно представить так:

$$I_k(pix) = \int F_k(x) \cdot PSF_k(x - m) dx. \quad (2)$$

Перейдем от функциональной зависимости к матричной. Предположим, что сетка координат пикселей для изображения со сверхразрешением равна $grid_k(x, y) = grid_k(z)$, и подставим в (2) вместо x :

$$I_k(pix) = \int F_k(grid_k(x, y)) PSF_k(grid_k(x, y) - m) \left| \frac{dgrid_k}{dz} \right| dz. \quad (3)$$

Обозначим $F_k(grid_k(x, y)) = \alpha(z)$ и подставим в (3):

$$I_k(pix) = \int \alpha(z) \cdot PSF_k(grid_k(z) - m) \left| \frac{dgrid_k}{dz} \right| dz. \quad (4)$$

Пусть $I'_k(pix')$ – новое изображение со сверхразрешением, состоящее из номеров пикселей (pix) высокого разрешения и получаемое в соответствии с $\alpha(z)$. Тогда перейдем от непрерывной к дискретной форме представления изображения:

$$I_k(pix) \cong \sum_{pix'} \left[I'(pix') \int_{pix'} PSF_k(grid_k(z) - m) \left| \frac{dgrid_k}{dz} \right| dz \right]. \quad (5)$$

Предположим, что

$$\beta_k(pix, pix') \cong \int_{pix'} PSF_k(grid_k(z) - m) \left| \frac{dgrid_k}{dz} \right| dz.$$

Тогда получим

$$I_k(pix) \cong \sum_{pix'} I'(pix') \cdot \beta_k(pix, pix'). \quad (6)$$

Если матрица высокого разрешения одна, то получим

$$I_k(pix) = I' \beta_k. \quad (7)$$

Предположим, что PSF содержит только пикселизацию изображения, исходных изображений несколько и достаточно, тогда однозначно можно найти значения пикселей нового изображения I' заданного размера, решая систему уравнений $I_k(pix) / b_k$.

В дальнейших исследованиях повышение разрешения будет рассмотрено на основе растрового (дискретного) изображения, имеющего определенную структуру, в которой пиксель является наименьшим логическим элементом. При увеличении масштаба изображения происходит укрупнение пикселей, тем самым повышается зернистость за счет окрашивания в один цвет соседних точек. Для уменьшения размера пикселей необходимо

ввести дополнительные точки, для которых требуется дополнительная информация. Эти данные можно получить путем взаимного смещения субпикселей исходных изображений. Поэтому задача получения сверхразрешения сводится к разработке алгоритма синтеза (совмещения снимков со смещением на доли пикселя) исходных изображений. Таким образом, значение нового пикселя получается за счет других пикселей, частично схожих между собой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе рассмотрены три основные группы методов повышения разрешения изображений, из которых линейные и нелинейные методы не вносят новой информации в изображение, чего нельзя сказать про метод суперразрешения. В нем используются данные сразу нескольких снимков, что позволяет вносить больше информации в результирующее изображение высокого разрешения. Также были представлены методы субпиксельной обработки изображений, которые позволяют повысить качество цифрового изображения за счет пространственных сдвигов и получения новых пикселей. Подробно представлена общая модель субпиксельной обработки данных, которая может применяться при решении различных прикладных задач при дистанционном зондировании Земли.

Необходимо отметить, что это только начальные исследования в области субпиксельной обработки аэрокосмических снимков, и имеется огромный потенциал для дальнейшего изучения данной области. В частности, можно рассмотреть одномерное и двумерное сканирование, повышение разрешения с помощью масок или методом восстановления цифровых изображений, реализовать их с помощью высокоуровневого языка программирования, провести экспериментальные исследования и сделать выводы о применимости того или иного метода при решении определенных прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фетисов Д.В., Колесенков А.Н. Субпиксельная обработка изображений как средство увеличения пространственного разрешения снимков // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2018. – Т. 2. – С. 390–391.
2. Фетисов Д.В., Колесенков А.Н. Увеличение пространственного разрешения аэрокосмических снимков с использованием субпиксельной обработки // Современные технологии в науке и образовании СТНО-2018: сборник трудов Международной научно-технической и научно-методической конференции. – Рязань, 2018. – С. 221–226.
3. Improving the aerospace image quality using subpixel processing for the earth's distance monitoring / D.V. Fetisov, A.N. Kolesenkov, T.A. Fetisova, V.V. Strotov // Proceedings Collections from SPIE Remote Sensing. – Berlin, 2018. – Paper 10792-17. – P. 1–6.
4. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N., Fetisova T.A. Automatic scaling method of aerospace images using spectral transformation // 2018 International Russian Automation Conference (IRAC). – Sochi, Russia, 2018. – DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501672.
5. Козлов В.Л., Кузьмичев И.П. Измеритель дальности и размерных параметров объектов на основе цифровой фотокамеры // Вестник БГУ. – 2011. – № 1. – С. 33–37.

6. Блажевич С.В., Селютина Е.С. Повышение разрешения цифрового изображения с использованием субпиксельного сканирования // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика. – 2014. – № 5. – С. 186–190.

7. Козлов В.Л., Васильчук А.С. Субпиксельная обработка изображений для измерения дальности на основе цифровой фотокамеры // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1. – С. 115–120.

8. Бескид П.П., Куракина Н.И., Орлова Н.В. Геоинформационные системы и технологии. – СПб.: РГГМУ, 2013. – 173 с.

9. Синтез цифровых изображений субпиксельного уровня разрешения с использованием расфокусировки / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Е.С. Селютина, Н.Н. Ушакова // Техническое зрение в системах управления, 2011: сборник трудов научно-технической конференции. – М., 2012. – С. 127–137.

10. Чернявский Г.М. Перспективы космического мониторинга Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – Т. 1. – С. 39–46.

11. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений: монография / пер. с англ. под ред. П.А. Чочиа. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

12. Костяшкин Л.Н., Логинов А.А., Никифоров М.Б. Проблемные аспекты системы комбинированного видения летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 61–65.

13. Таганов А.И. Анализ и классификация рисков проекта методами нечеткой кластеризации // Информационные технологии моделирования и управления. – 2010. – № 4 (63). – С. 455–461.

14. Костров Б.В., Саблина В.А. Адаптивная фильтрация изображений со структурными искажениями // Цифровая обработка сигналов. – 2008. – № 4. – С. 49–53.

15. Костров Б.В., Костров В.В., Саблина В.А. Алгоритм восстановления изображений с периодическими низкочастотными искажениями // Радиотехника. – 2009. – № 11. – С. 92–95.

Фетисов Дмитрий Вадимович, аспирант кафедры космических технологий Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – компьютерная обработка аэрокосмических снимков, дистанционное зондирование Земли, получение изображений со спутников. Имеет более 30 публикаций. E-mail: morzitko@gmail.com

Колесенков Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космических технологий Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – дистанционный мониторинг объектов и территорий. Имеет более 100 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: sk62@mail.ru

Бабаев Сергей Игоревич, старший преподаватель кафедры электронных вычислительных машин Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – обработка аэрокосмических изображений. Имеет более 50 публикаций. E-mail: babaev.s.i@gmail.com

Фетисова Татьяна Анатольевна, аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – параллельные вычисления, ускорение алгоритмов обработки данных. Имеет более 40 публикаций. E-mail: ryugova_ta@mail.ru

Fetisov Dmitry Vadimovich, a postgraduate student at the department of space technologies in the Ryazan State Radio Engineering University. His research interests are focused on computer processing of aerospace images, remote sensing of Earth, and receiving satellite images. He is the author of over 30 publications. E-mail: morzitko@gmail.com

Kolesenkov Alexander Nikolaevich, PhD (Eng.), an associate professor at the department of space technologies in the Ryazan State Radio Engineering University. His research interests are focused on remote monitoring of objects and areas. He is the author of over 100 publications including 1 monograph. E-mail: sk62@mail.ru

Babaev Sergei Igorevich, an assistant professor at the computer department in the Ryazan State Radio Engineering University. His research interests are focused on computer processing of aerospace images. He is the author of over 50 publications. E-mail: babaev.s.i@gmail.com

Fetisova Tatiana Anatolievna, a postgraduate student at the department of automated design of computers in the Ryazan State Radio Engineering University. Her research interests are focused on parallel computations and acceleration of data processing algorithms, She is the author of over 40 publications. E-mail: pyurova_ta@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-89-100

Development of a model for sub-pixel processing of aerospace images during remote sensing of the Earth*

D.V. FETISOV^a, A.N. KOLESENKOV^b, S.I. BABAEV^c, T.A. FETISOVA^d

Ryazan State Radio Engineering University, 59/1, Gagarin St., Ryazan, 390005, Russian Federation

^a morzitko@gmail.com ^b sk62@mail.ru ^c babaev.s.i@gmail.com ^d pyurova_ta@mail.ru

Abstract

Digital processing is widely used in industry, education and space which work with high-resolution images. For remote sensing of the Earth's surface, high resolution images are needed to study the subsoil and minerals. However, images obtained from satellites and using aerial photography do not always have a sufficient quality. As a result they are subjected to additional computer processing. Therefore, the development of a model of sub-pixel processing of aerospace images for the subsequent improvement of their quality is an important task for theoretical studies and solving various applied problems.

Space photography is an important component for obtaining photographs of the terrain and its subsequent analysis. It can be carried out in various ways: through a single or aimed, route or global survey, each of which has its own advantage. Also, satellite survey differs with respect to scale, visibility, spatial resolution and spectral characteristics.

To improve the quality of images obtained, there are 3 groups of methods used: linear, nonlinear methods and super resolution. The last method is also called scanning, which refers to the processing of several low-resolution images shifted relative to each other by a part of a pixel. In order to improve the quality of the image using the sub-pixel processing method, a model was developed that implies the transformation of the original "continuous" image into a "discrete" (as a matrix) through point scattering functions.

Thus, this article analyzes the means for obtaining satellite images of the Earth's surface, discusses methods for improving their quality, and also develops a model of sub-pixel processing of aerospace images during remote sensing of the Earth, which will allow research and monitoring of minerals and the state of the Earth's interior.

Keywords: image, super-resolution, model, scanning, sub-pixel processing, method, Earth remote sensing, space image

* Received 24 December 2018.

REFERENCES

1. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N. [Subpixel image processing as the means of increasing the spatial resolution of images]. *Novye informatsionnye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh: materialy XXIII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov* [Materials of the XXIII All-Russian scientific and technical conference of students, young scientists and specialists "New information technologies in scientific research"], Ryazan, 2018, vol. 2, pp. 390–391. (In Russian).
2. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N. [Increasing the Spatial Resolution of Aerospace Images using Subpixel Processing]. *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii STNO-2018: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi i nauchno-metodicheskoi konferentsii* [Collection of works of the International scientific, technical and scientific-methodical conference "Modern technologies in science and education", STNO-2018], Ryazan, 2018, pp. 221–226. (In Russian).
3. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N., Fetisova T.A., Strotov V.V. Improving the aerospace image quality using subpixel processing for the earth's distance monitoring. *Proceedings Collections from SPIE Remote Sensing*, 2018, Berlin, Germany, paper 10792–17, pp. 1–6.
4. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N., Fetisova T.A. Automatic scaling method of aerospace images using spectral transformation. *2018 International Russian Automation Conference (IRAC)*, Sochi, Russia, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501672.
5. Kozlov V.L., Kuz'michev I.R. Izmeritel' dal'nosti i razmernykh parametrov ob'ektov na osnove tsifrovoi fotokamery [Measuring instrument of range and size parameters of objects on the basis of a digital camera]. *Vestnik BGU – Bulletin of BSU*, 2011, no. 1, pp. 33–37.
6. Blazhevich S.V., Selyutina E.S. Povyshenie razresheniya tsifrovogo izobrazheniya s ispol'zovaniem subpiksel'nogo skanirovaniya [Enhancing the resolution of a digital image using subpixel scanning]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika – Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics and Physics*, 2014, no. 5, pp. 186–190.
7. Kozlov V.L., Vasil'chuk A.S. Subpiksel'naya obrabotka izobrazhenii dlya izmereniya dal'nosti na osnove tsifrovoi fotokamery [Sub-pixel image processing for ranging based on a digital camera]. *Pribory i metody izmerenii – Devices and Methods of Measurements*, 2012, no. 1, pp. 115–120.
8. Beskid P.P., Kurakina N.I., Orlova N.V. *Geoinformatsionnye sistemy i tekhnologii* [Geographic information systems and technologies]. St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2013. 173 p.
9. Blazhevich S.V., Vintaev V.N., Selyutina E.S., Ushakova N.N. [Synthesis of digital images of subpixel level of resolution using defocusing]. *Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya, 2011: sbornik trudov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Computer vision in control systems 2011. Proceedings of the scientific-technical conference]. Moscow, 2012, pp. 127–137. (In Russian).
10. Chernyavskii G.M. Perspektivy kosmicheskogo monitoringa zemli [Prospects for earth space monitoring]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa – Current problems in remote sensing of the earth from space*, 2004, vol. 1, pp. 39–46.
11. Gonzalez R.C., Woods R.E. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii [Digital image processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 1072 p. (In Russian).
12. Kostyashkin L.N., Loginov A.A., Nikiforov M.B. Problemye aspekty sistemy kombinirovannogo videniya letatel'nykh apparatov [Problem aspects of the system of combined vision of aircraft]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2013, no. 5 (142), pp. 61–65.
13. Taganov A.I. Analiz i klassifikatsiya riskov proekta metodami nechetkoi klasterizatsii [Analysis and classification of project risks using fuzzy clustering methods]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya – Information Technologies for Modeling and Management*, 2010, no. 4 (63), pp. 455–461.

14. Kostrov B.V., Sablina V.A. Adaptivnaya fil'tratsiya izobrazhenii so strukturnymi iskazheniyami [Adaptive filtering of images with structural distortions]. *Tsifrovaya obrabotka signalov – Digital Signal Processing*, 2008, no. 4, pp. 49–53.

15. Kostrov B.V., Kostrov V.V., Sablina V.A. Algoritm vosstanovleniya izobrazhenii s periodicheskimi nizkochastotnymi iskazheniyami [Algorithm for restoring images with periodic low-frequency distortions]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2009, no. 11, pp. 92–95.

Для цитирования:

Разработка модели субпиксельной обработки аэрокосмических снимков при дистанционном зондировании Земли / Д.В. Фетисов, А.Н. Колесенков, С.И. Бабаев, Т.А. Фетисова // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 89–100. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-89-100.

For citation:

Fetisov D.V., Kolesenkov A.N., Babaev S.I., Fetisova T.A. Razrabotka modeli subpiksel'noi obrabotki aerokosmicheskikh snimkov pri distantsi-onnom zondirovanii Zemli [Development of a model for sub-pixel processing of aerospace images during remote sensing of the Earth]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 89–100. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-89-100.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 510.6., 004.421, 523.21

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-101-114

Комплементарные отношения^{*}

В.Я. ЦВЕТКОВ

109029, РФ, г. Москва, ул. Нижегородская, 27, строение 1, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС)

svj2@mail.ru

При организации вычислений вычислительные процессы должны обладать свойствами согласованности и непротиворечивости. Эти свойства можно рассматривать как результат комплементарности и наличия комплементарных отношений. В теории системы сложные системы должны обладать свойствами целостности и полноты. Наличие этих свойств есть признак комплементарных отношений. В науках о Земле, в частности в области геоинформатики, используют набор последовательных технологий обработки пространственной информации. Обработке информации предшествуют технологии сбора информации. За ними следуют технологии первичной обработки и отбраковки. Затем идут технологии моделирования, хранения и так далее. Совокупность разных технологий, решающих общую задачу, связывают комплементарные отношения. Статья исследует комплементарные отношения как специфический вид сложных отношений. Сложность заключается в многообразии форм комплементарных отношений. Комплементарные отношения могут присутствовать в коммуникационных сетях, ситуациях, в сложных системах. Комплементарные отношения создают свойство комплементарности или состояние комплементарности. Статья систематизирует виды комплементарности и вводит понятия: функциональная комплементарность, системная комплементарность, логическая комплементарность. Логическая комплементарность дополняет другие виды комплементарности. Она позволяет проверять различные технологии и структуры на непротиворечивость и истинность. Логическая комплементарность позволяет проверять также различные процессы на истинность и непротиворечивость. Многие методы верификации программ используют свойство комплементарности неявно.

Ключевые слова: комплементарность, отношения, информационные отношения, комплементарные отношения, непротиворечивость

ВВЕДЕНИЕ

Комплементарность является полисемическим понятием [1]. Лингвистически она является аналогом дополнительности и может рассматриваться как качество, свойство, отношение, состояние. Анализ определений и трактовок

^{*} *Статья получена 13 декабря 2018 г.*

показывает, что большая часть этого понятия отражается прямыми свойствами: согласованность, дополняемость, сопряженность, следуемость, ситуативность. Понятие комплементарности отражается также оппозиционными признаками – непротиворечивостью и неопозиционностью.

Оксфордский словарь [2] дает предикативную интерпретацию комплементарности: *отношение* или *ситуация*, в которой вещи улучшают или подчеркивают качества друг друга. Словарь Мериам-Вебстер [3] содержит атрибутивную интерпретацию: комплементарность – это *качество* или *состояние* (взаимодополняемости). В словаре делового английского языка это понятие трактуется как *принцип* дополнительности. Анализ работ в области комплементарности дает основание утверждать, что результатом комплементарности является согласованность, упорядоченность, системность, эмерджентность и в отдельных случаях синергия. В силу этого комплементарность выступает как оппозиция хаоса и неопределенности. Комплементарность применяют в медицине [4], биологии [5, 6], инвестиционной деятельности [7, 8] и образовании [9]. Комплементарный подход применяют при оценке рынка [9, 10]. Комплементарность как качество всегда вызывает улучшение свойств ресурсов [11], совокупностей и систем.

Развитию теории комплементарности способствовали области математики, включающие оптимизацию [1], нелинейный анализ, проблемы равновесия, теорию вариационного неравенства, теорию неподвижных точек, теорию топологических степеней [12]. Теория комплементарности интенсивно развивается в психологии [13] и математике [14].

В теории математической оптимизации проблема линейной комплементарности часто возникает в вычислительной механике и включает в себя квадратичное программирование. Проблемы комплементарности были первоначально изучены, в линейном программировании и квадратичном программировании они представляют собой проблему линейной комплементарности (LCP), проблему нелинейной комплементарности (NCP) и проблему смешанной комплементарности (MCP).

В математике проблема комплементарности представляет собой частную проблему оптимизации. Задача оптимизации функции двух векторных переменных связана с определенными требованиями, которые включают требование того, что скалярное произведение двух векторов должно быть равно нулю [15], т. е. они должны быть ортогональны.

Для конечномерных вещественных векторных пространств комплементарность означает, что если есть векторы X и Y со всеми неотрицательными компонентами ($x_i \geq 0$ и $y_i \geq 0$ для всех i), то для каждой пары компонент (x_i, y_i) одна из пары компонент должна быть равна нулю, что обеспечивало комплементарность как дополняемость. Например, $X = (1, 0)$ и $Y = (0, 2)$ дополняют друг друга – они комплементарны. Но $X = (1, 1)$ и $Y = (2, 0)$ – не комплементарны. Проблема комплементарности является частным случаем вариационного неравенства. Несмотря на изученность в математике и психологии, можно констатировать недостаточное исследование этого феномена как отношения. Это делает актуальным исследование комплементарности и эффектов, которые она создает. В статье рассматривается комплементарность как специфическое отношение.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Принципиальным является то, что комплементарность не может быть описана формально одним типом отношений. Она охватывает комплекс разных отношений: логических, функциональных, теоретико-множественных, лингвистических, математических, юридических. При рассмотрении комплементарности обязательно рассматривают не менее двух объектов. В исчислении высказываний [16, 17] комплементарность выражается отношениями импликации, эквивалентности и конъюнкции. Объекты A и B комплементарны, если между ними имеют место отношения, задаваемые комплементарным рядом:

$$A \rightarrow B \equiv 1; A \sim B \equiv 1; A \wedge B \equiv 1; A|B \equiv 0; A \vdash B. \quad (1)$$

Выражение (1) является примером комплементарного ряда и описывает следующие отношения между A и B : импликация (истина), эквивалентность (истина), конъюнкция (истина), $|$ – штрих Шеффера (ложь), \vdash – выводимость. Объекты A и B не комплементарны, если между ними имеют место другие отношения, которые дает пример некомплементарного ряда.

$$A \rightarrow B \equiv 0; A \oplus B \equiv 1; A \wedge B \equiv 0; A \vee B \equiv 0. \quad (2)$$

Выражение (2) является примером некомплементарного ряда и описывает следующие отношения между A и B : импликация (ложь), «исключающее или» (истина), конъюнкция (ложь), дизъюнкция (ложь) и т. д.

Принципиальным для выражений (1) и (2) является то, что один и тот же логический оператор может описывать комплементарность или некомплементарность в зависимости от логического значения. Это подчеркивает сложность описания комплементарности.

В исчислении предикатов комплементарность как отношение отображается набором двухместных предикатов. Можно ввести двухместный предикат $R(x, y)$, который отображает комплементарность между (x, y) .

Возможна множественная комплементарность между несколькими объектами. Примером является гипотеза в математической логике. Напомним, что гипотезой B формулы A понимается такая формула B , что

$$(B \rightarrow A) \equiv 1.$$

Гипотеза $B(x)$ формулы A называется простой, если она есть конъюнкция переменных или их отрицаний и после отбрасывания любого из ее сомножителей перестает быть гипотезой формулы A . Комплементарными являются конъюнкты гипотезы. В качестве примера рассмотрим 9 конъюнктов:

$$B(x) = (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5 \wedge \neg x_6 \wedge \neg x_7 \wedge x_8 \wedge x_9). \quad (3)$$

Выражение (3) является комплементарным. Некомплементарным является выражение (4), связанное с выражением (3). Оно получается исключением одного из переменных ($\neg x_6$):

$$\bar{B} = (x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge \neg x_5 \wedge \neg x_7 \wedge x_8 \wedge x_9). \quad (4)$$

В выражении (4) величина \bar{B} обозначает «не гипотезу», т. е. «не фактор». Выражений типа (2) может быть много, выражение (3) только одно. Некомплементарных ситуаций или выражений всегда больше, чем комплементарных. Это определяет технику организации комплементарности. Согласованность осуществляют множеством методов, что затрудняет выработку единого подхода формирования комплементарности. Непротиворечивость – логическая категория, которая может быть также реализована средствами математической логики для формирования комплементарности. Непротиворечивость может служить инструментом формирования комплементарности. В случае анализа непротиворечивости можно выработать общий подход к оценке и созданию комплементарности средствами математической логики, например, на основе метода резолюций. Инверсия комплементарного выражения \bar{B} или $\neg B$ всегда означает некомплементарность.

Комплементарность выражается не только средствами двоичной логики, но средствами троичной логики. Известное правило переноса транзитивности отражает комплементарность отношений между тремя объектами. «Если из A следует B , а из B следует C , то из A следует C ».

Пример. Площадь круга A больше площади прямоугольника B . Площадь прямоугольника B больше площади треугольника C . Следовательно, площадь A больше площади C . Это правило действительно в математике. В реальной жизни оно может нарушаться [18]. Это часто бывает на спортивных соревнованиях: команда A побеждает команду B . Команда B побеждает команду C , но команда C побеждает команду A . В этом случае имеет место некомплементарность. Геометрически эти ситуации отражают треугольники согласования и противоречия.

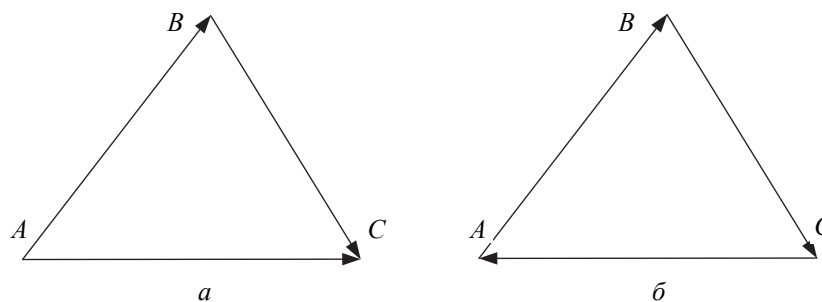


Рис. 1. Треугольники согласования (комплементарности) (а) и противоречия (некомплементарности) (б)

Fig. 1. Triangles reconciliation (complementarity) (a) and contradictions (non-complementarity) (b)

Отношения на рис. 1 показывают комплементарную и некомплементарную ситуацию. Это говорит о том, что в отдельных случаях комплементарность или некомплементарность выражаются графическими или топологическими схемами. В частности, ациклические алгоритмы [19] являются примером комплементарности. Ситуации заикливания или зависания характеризуют некомплементарность.

2. КОМПЛЕМЕНТАРНОСТЬ КАК СВОЙСТВО ИЛИ СОСТОЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИТУАЦИИ

Комплементарность является не индивидуальной, а множественной характеристикой. Поэтому ее легко применить в модели информационной ситуации, которая описывает множество объектов и отношений. Комплементарность как отношение и состояние можно оценить для информационной ситуации. В сложной системе параметры комплементарны относительно общей задачи системы. В информационной ситуации такой задачи первоначально нет. Информационная ситуация [20, 21] является универсальной информационной моделью, описывающей реальную ситуацию. Ее начальная главная функция – описание реальной ситуации с выделенными в ней объектами, отношениями и связями. Информационная ситуация может быть рассмотрена как множественное условие, которое используют при решении разных задач. При появлении конкретной задачи в информационной ситуации отбирают те параметры или показатели, которые необходимы для решения именно этой задачи. Выделенные параметры называют ключевыми параметрами или ключевыми показателями. В этом случае информационная ситуация преобразуется в специализированную модель, которая необходима для решения задачи или для принятия конкретного решения. В специализированной информационной ситуации можно оценивать комплементарность применительно к решаемой задаче.

Из (15) и (17) следует, что задача управления триподом (см. рис. 1) может быть решена путем применения трех практически аналогичных агентов, каждый из которых решает задачу управления одной из систем второго порядка (17). Формально решения этих систем не зависят друг от друга, однако их практическая реализация должна осуществляться с учетом совместных соотношений (11), (16) и ограничений (6), (10).

Комплементарность информационной ситуации упрощает решение задачи. Некомплементарность параметров информационной ситуации затрудняет решение задачи или повышает сложность решения задачи. В информационной ситуации комплементарность между параметрами, процессами или объектами схожа с понятием информационное соответствие [22, 23]. Информационное соответствие всегда выражается отношением эквивалентности или изоморфизмом. Комплементарность выражается отношениями эквивалентности, принадлежности, импликации, конъюнкции и другими операторами. Принципиально то, что она может соответствовать одному из названных отношений или включать их в комбинации. Это означает, что комплементар-

ность может описываться не только простой логической связкой, но и логической формулой. Комплементарность ситуации можно оценить как комплементарность по одному параметру, по нескольким параметрам или по всем ключевым параметрам данной информационной ситуации. Это приводит к понятию частичной или полной комплементарности информационной ситуации.

3. КОМПЛЕМЕНТАРНОСТЬ МЕЖДУ СИСТЕМАМИ

Комплементарность внутри системы присутствует всегда. Она может быть сильной или слабой, но имеет место. Комплементарность между системами может быть или не быть. Комплементарность между системами можно оценить исходя из системного описания. Системный подход [24, 25] позволяет описать сложную систему (*SYS*) с выделением ее ключевых показателей. Применительно к задаче исследования комплементарности можно дать следующее описание системы:

$$SYS = \langle F, Str, E, C, R, G, int, out, Sem, Seq, D \rangle. \quad (5)$$

В выражении (5) *F* – множество функций системы; *Str* – структура системы; *E* – множество элементов в системе; *C* – множество связей; *R* – множество отношений; *G* – множество целей; *int* – множество входов; *out* – множество выходов системы; *Sem* – семантическое содержание системы или используемых данных; *Seq* – прескриптивная модель действий системы; *D* – типы данных, используемых системой. Практически на всех выделенных параметрах сложной системы комплементарность может быть или не быть. Комплементарность может быть внутренней между частями системы. Комплементарность может быть внешней между разными системами. Наличие внутренней комплементарности улучшает эффективность системы, отсутствие – ослабляет параметры.

Комплементарность между разными системами проявляется на множестве функций и элементов. Она явно выделяется в связях и отношениях. На входах и выходах она выступает как фактор согласования. Последовательность действий также может характеризоваться комплементарностью или противоречивостью. В современных системах даже типы данных должны быть комплементарны технологиям обработки и алгоритмам [26].

Для современных информационных и вычислительных систем важным фактором является оценка качества системы. Основой оценки качества программного обеспечения в настоящее время являются два стандарта: отечественный стандарт ГОСТРИСО/МЭК25010-2015 «Информационные технологии (ИТ). Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов» и зарубежный стандарт ISO/IEC25010:2011 «Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программного обеспечения» [26]. По существу эти стандарты задают нормы компле-

ментарности между программным обеспечением, данными и технологией обработки.

Комплементарность не всегда означает полное соответствие по всем параметрам системы. Она означает также либо частичное соответствие, либо согласованность только по ключевым показателям. Видов комплементарности в системах может быть много. Комплементарность может быть по функции, по цели, по входам выходам, по семантическому содержанию, по последовательности действий, по данным.

Параметр F в выражении (5) задает системно-функциональную комплементарность систем или процессов. Системная функциональная комплементарность включает три вида: функциональную комплементарность (*functional conformity*), функциональное дополнение (*functional complement*), функциональную согласованность (*functional consistency*).

Функциональная комплементарность означает дополняемость и согласованность функций разных систем при решении определенной задачи. Функциональное дополнение означает, что функции разных систем дополняют друг друга при решении общей задачи. Например, система сбора информации, система первичной обработки, система моделирования, система обработки и система представления информации – комплементарны. Они действуют по схеме, показанной на рис. 2. Выход одной системы является входом для другой. Как правило, такая комплементарность свойственна специализированным системам или процессам. Функциональная согласованность означает непротиворечивость функций разных систем. В сравнении с функциональной комплементарностью это более слабая комплементарность.

Может существовать комплементарность по данным. Если существует система A с набором данных DA и система B с набором данных DB , то комплементарность по данным означает

$$DA \subset DB \oplus DB \subset DA. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что в случае комплементарности данные одной системы можно использовать для другой системы, но не наоборот. В выражении (6) комплементарность выступает как отношение принадлежности.

Параметр Sem задает семантическую комплементарность систем или моделей, которая включает три вида семантической комплементарности: семантическое соответствие, семантическое дополнение.

Семантическое соответствие как комплементарное отношение означает, что результаты процессов или функций семантически выражают одно и то же. Они подтверждают друг друга и не противоречат друг другу. Семантическое дополнение как комплементарное отношение означает, что результаты процессов или функций семантически дополняют друг друга и создают общую целостность при интерпретации результатов обработки. Комплементарность «семантическое соответствие» служит подтверждением результатов обработки. Комплементарность «семантическое дополнение» служит основой целостности результатов обработки.

В математике существуют разные виды комплементарности, что дает основание выражать их разными описаниями. Например, для операций коммутативности

$$(a + b) = (b + a) \forall a, b \in A$$

и ассоциативности

$$(a + b) + c = a + (b + c) \forall a, b \in A$$

существует информационное соответствие и одновременно комплементарность. Для операций дистрибутивности

$$xf(a + b) = xf(b) + xf(c) \forall a, b \in A,$$

$$P_1 = x f(a + b), P_2 = x f(a) + x f(b), Q = f(a + b).$$

Существует информационное соответствие между P_1, P_2 и комплементарность между Q и P_1 .

4. КОМПЛЕМЕНТАРНОСТЬ В ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОПИСАНИЯХ

Если рассматривать суперпозицию функций со значением истина, то ее наличие также является носителем функциональной комплементарности. В теории множеств комплементарность отражается отношениями принадлежности \in или включения \subseteq . В функциональном анализе комплементарность выражается функциональной зависимостью.

Комплементарность в функциональных описаниях и схемах принятия решений может быть рассмотрена как композиция функций, отраженная в композиции формул. Формулы, включая логические, можно рассматривать как формализацию композиции функций. Различные формы функционального описания дают возможность проводить многосторонний анализ комплементарности и поиск ее разных форм

Функции отображают по-разному. Классическая запись $y = f(x)$ говорит о том, что функция преобразует входные переменные x в выходные переменные y . Системная запись этого же процесса [28] $f: X \rightarrow Y$ говорит о том, что имеет место функциональное преобразование входного множества X в выходное множество Y . Простая суперпозиция имеет вид

$$g(f(x)). \tag{7}$$

Если функция f выполнима и истинна, это влечет выполнение функции g (рис. 2). Если функция f выполнима и истинна и функция g выполнима и истинна, то функции g и f – комплементарны. Если функция f или функция g невыполнимы, то функции g и f – некомплементарны. Выражение (7) имеет графическое представление. Оно показано на рис. 2.

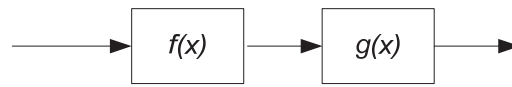


Рис. 2. Графическая форма суперпозиции двух функций

Fig. 2. Graphic superposition of two functions

Выражение (5) описывает суперпозицию функций $f(x)$ и $g(x)$. Схема на рис. 1 является функционально-логической, и ее основное назначение – проверка композиции функций $f(x)$ и $g(x)$. На рис. 1 выход $f(x)$ является входом для $g(x)$. Это означает комплементарность функций по выходу / входу. Функций может быть много. Конъюнктивная форма является основой комплементарных функций

$$S = f_1 \wedge f_2 \wedge \dots \wedge f_n. \quad (8)$$

В выражении (8) сложная функция, которая сформирована как конъюнкция более простых функций. Если хоть одна из функций f_n невыполнима, то невыполнима S . Это является особенностью комплементарных функций – функциональным дополнением. Комплементарность сложных функций оценивается по трем критериям: потоковая (вход / выход), функциональная (соответствие функций), логическая.

Если рассматривать схему как совокупность булевых функций, можно упростить анализ. В общем случае имеется n булевых (принимающих значения 0 и 1) переменных x_1, \dots, x_n , называемых входами. Также имеется некоторое число булевых переменных y_1, \dots, y_m , называемых выходами или проводниками (рис. 1). Входы и выходы связывают функции. Для каждого проводника схемы может быть задана булева функция из набора булевых функций B , выражающая его через другие проводники и входы. Для обеспечения комплементарности требуется, чтобы не было циклов. При этом возможны два варианта. Булева функция является технической функцией и реализует работу с двоичными сигналами – это случай соответствия. Булева функция отражает логику других функций – это случай отражения. Проведенный анализ позволяет ввести понятие логической комплементарности. Логическая комплементарность, или логическая непротиворечивость, есть отношение внутри сложной системы, алгоритма или схемы принятия решений, для которой отсутствует логическая противоречивость в выполнении процессов или вычислений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплементарность является сложным видом отношений, описание которых в ряде случаев не осуществляется одним математическим или логическим оператором. Комплементарность можно рассматривать как группу специфических отношений, обобщающую более простые отношения. Комплементарность как характеристика является важной для сложных систем и вы-

числительных процессов. Комплементарность повышает качество и надежность. Логическая комплементарность как отношение является важной составляющей схемы обработки информации или системы принятия решений. Наличие отношения комплементарности позволяет решать две задачи. Первая задача структурного анализа – задача анализа структуры системы или технологии на предмет согласованности и непротиворечивости. Вторая задача процессуального анализа – задача анализа процессов внутри структуры системы или технологии на предмет выполнимости и непротиворечивости. Можно констатировать, что на блоки обработки информации или функциональной системы можно составить разные виды описаний: логическое, системное и функционально логическое. Каждое описание допускает свой вид комплементарности и дает возможность оценить совокупную комплементарность. Для определения структуры необходимо использовать логические связки и функционально логическое описание. Логическая комплементарность доказывается и проверяется средствами математической логики. Функциональная комплементарность проверяется средствами функционального анализа. Системная комплементарность оценивается методами системного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cottle R.W.* Linear complementarity problem // Encyclopedia of Optimization. – Boston, MA: Springer, 2008. – P. 1873–1878.
2. Complementarity [Electronic resource]. – URL: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/complementarity> (accessed: 19.06.2019).
3. Complementarity [Electronic resource]. – URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/complementarity> (accessed: 19.06.2019).
4. *Tom Xu K., Farrell T.W.* The complementarity and substitution between unconventional and mainstream medicine among racial and ethnic groups in the United States // Health Services Research. – 2007. – Vol. 42, N 2. – P. 811–826.
5. The microRNA.org resource: targets and expression / D. Betel, M. Wilson, A. Gabow, D.S. Marks, C. Sander // Nucleic Acids Research. – 2008. – Vol. 36, suppl. 1. – P. D149–D153.
6. *Vallurupalli P., Kay L.E.* Complementarity of ensemble and single-molecule measures of protein motion: a relaxation dispersion NMR study of an enzyme complex // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2006. – Vol. 103, N 32. – P. 11910–11915.
7. *Kazempour S.J., Conejo A.J., Ruiz C.* Strategic generation investment using a complementarity approach // IEEE Transactions on Power Systems. – 2011. – Vol. 26, N 2. – P. 940–948.
8. *Богутдинов Б.Б., Цветков В.Я.* Применение модели комплементарных ресурсов в инвестиционной деятельности // Вестник Мордовского университета. – 2014. – Т. 24, № 4. – С. 103–116.
9. *Brunello G.* Labour market institutions and the complementarity between education and training in Europe // Education, training and labour market outcomes in Europe. – London: Palgrave Macmillan, 2004. – P. 188–210.
10. *Xian W., Yuzeng L., Shaohua Z.* Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach // IEEE Transactions on Power Systems. – 2004. – Vol. 19, N 3. – P. 1348–1355.
11. *Цветков В.Я.* Комплементарность информационных ресурсов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 2. – С. 182–185.
12. *Isac G.* Topological methods in complementarity theory. – Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2013. – 494 p.

13. *Fiske A.P.* Complementarity theory: why human social capacities evolved to require cultural complements // *Personality and Social Psychology Review*. – 2000. – Vol. 4, N 1. – P. 76–94.
14. *Garcia C.B.* Some classes of matrices in linear complementarity theory // *Mathematical Programming*. – 1973. – Vol. 5, N 1. – P. 299–310.
15. *Billups S.C., Murty K.G.* Complementarity problems // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2000. – Vol. 124, N 1–2. – P. 303–318.
16. *Верецагин Н.К., Шень А.* Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Ч. 2. Языки и исчисления. – 4-е изд., испр. – М.: МЦНМО, 2012. – 240 с.
17. *Ben-Ari M.* Mathematical logic for computer science. – 3rd ed. – London; New York: Springer, 2012. – 364 p.
18. *Tsvetkov V.Ya.* Not transitive method preferences // *Journal of International Network Center for Fundamental and Applied Research*. – 2015. – Vol. 3, iss. 1. – P. 34–42. – DOI: 10.13187/jincfar.2015.3.34.
19. *Бабурин Д.Е.* Иерархический подход для автоматического размещения ациклических графов // *Современные проблемы конструирования программ*. – Новосибирск, 2002. – С. 7–37.
20. *Tsvetkov V.Ya.* Information situation and information position as a management tool // *European Researcher. Series A*. – 2012. – Vol. 12-1 (36). – P. 2166–2170.
21. *Розенберг И.Н.* Информационная ситуация как сложная система // *Образовательные ресурсы и технологии*. – 2017. – № 3 (20). – С. 69–77.
22. *Ожерельева Т.А.* Информационное соответствие и информационный морфизм в информационном поле // *ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении*. – 2017. – № 4. – С. 86–92.
23. *Номоконова О.Ю.* Виды информационных соответствий // *Славянский форум*. – 2018. № 2 (20). – С. 44–49.
24. *Цветков В.Я.* Решение проблем с использованием системного анализа // *Перспективы науки и образования*. – 2015. – № 1. – С. 50–55.
25. *Кудж С.А.* Системный подход // *Славянский форум*. – 2014. – № 1 (5). – С. 252–257.
26. *Щенников А.Н.* Комплементарность сложных вычислений // *Славянский форум*. – 2018. – № 2 (20). – С. 118–123.
27. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models [Electronic resource]. – URL: <https://www.iso.org/standard/35733.html> (accessed: 20.06.2019).
28. *Месарович М., Такахара Н.* Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 311 с.

Цветков Виктор Яковлевич, доктор технических наук, профессор Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), заместитель руководителя Центра стратегического анализа и развития. Основное направление научных исследований: геоинформатика, управление, информационные технологии. Автор свыше 600 научных трудов. Подготовлено 6 учебников, 41 монография и 40 брошюр. E-mail: cvj2@mail.ru

Tsvetkov Viktor Yakovlevich, Doctor of Technical Sciences, Professor in the Scientific Research and Design Institute for Information, Automation and Communication in Railway Transport (NIAS), Deputy Head of the Center for Strategic Analysis and Development. The main direction of scientific research include geoinformatics, management, and information technology. He is the author of over 600 scientific papers including 6 textbooks, 41 monographs and 40 brochures. E-mail: cvj2@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-101-114

Complementary relationships*

V.Ya. TSVETKOV

Research and Design Institute of Design Information, Automation and Communication on Railway Transport 27, Nizhegorodskaya Street, bldg 1, Moscow, 109029, Russian Federation

cvj2@mail.ru

Abstract

The organization of computation requires that computational processes have the properties of consistency and consistency. These properties are the result of complementarity and the presence of complementary relations. In the system theory, complex systems must have the properties of integrity and completeness. Integrity and completeness is a sign of complementary relations. In Earth sciences, in particular, in the field of geoinformatics, a set of sequential technologies for processing spatial information is used. Information processing is preceded by information gathering technology. Then the technology of preprocessing and rejection follows. The next steps are technology modeling, storage, and so on. A set of different technologies that solve a common problem, connect complementary relationships. The article explores complementary relationships as a specific kind of complex relationships. The complexity of complementary relationships is due to the diversity of their forms. Complementary relationships are present in communication networks, in information situations, and in complex systems. Complementary relationships create a complement property or a state of complementarity. The article systematizes the types of complementarity and introduces the following concepts: functional complementarity, systemic complementarity, and logical complementarity. Logical complementarity complements other types of complementarity. It allows you to test various technologies and structures for inconsistency and truth. Logical complementarity allows checking various processes for truth and non-inconsistency. Program verification methods use the complementarity property.

Keywords: complementarity, relationships, informational relationships, complementary relationships, consistency

REFERENCES

1. Cottle R.W. Linear complementarity problem. *Encyclopedia of Optimization*. Boston, MA, Springer, 2008, pp. 1873–1878.
2. *Complementarity*. Available at: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/complementarity> (accessed 19.06.2019).
3. *Complementarity*. Available at: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/complementarity> data view (accessed 19.06.2019).
4. Tom Xu K., Farrell T.W. The complementarity and substitution between unconventional and mainstream medicine among racial and ethnic groups in the United States. *Health Services Research*, 2007, vol. 42, no. 2, pp. 811–826.
5. Betel D., Wilson M., Gabow A., Marks D.S., Sander C. The microRNA.org resource: targets and expression. *Nucleic Acids Research*, 2008, vol. 36, suppl. 1, pp. D149–D153.
6. Vallurupalli P., Kay L.E. Complementarity of ensemble and single-molecule measures of protein motion: a relaxation dispersion NMR study of an enzyme complex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, vol. 103, no. 32, pp. 11910–11915.

* Received 13 December 2018.

7. Kazempour S.J., Conejo A.J., Ruiz C. Strategic generation investment using a complementarity approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 940–948.
8. Bogutdinov B.B., Tsvetkov V.Ya. Primenenie modeli komplementarnykh resursov v investitsionnoi deyatel'nosti [Application of the model of complementary resources in investing activities]. *Vestnik Mordovskogo universiteta – Mordovia University Bulletin*, 2014, vol. 24, no. 4, pp. 103–116.
9. Brunello G. Labour market institutions and the complementarity between education and training in Europe. *Education, training and labour market outcomes in Europe*. London, Palgrave Macmillan, 2004, pp. 188–210.
10. Xian W., Yuzeng L., Shaohua Z. Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, vol. 19, no. 3, pp. 1348–1355.
11. Tsvetkov V.Ya. Komplementarnost' informatsionnykh resursov [Complementarity information resources]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy – International journal of applied and fundamental research*, 2016, no. 2, pp. 182–185.
12. Isac G. *Topological methods in complementarity theory*. Dordrecht, Springer Science & Business Media, 2013. 494 p.
13. Fiske A.P. Complementarity theory: why human social capacities evolved to require cultural complements. *Personality and Social Psychology Review*, 2000, vol. 4, no. 1, pp. 76–94.
14. Garcia C.B. Some classes of matrices in linear complementarity theory. *Mathematical Programming*, 1973, vol. 5, no. 1, pp. 299–310.
15. Billups S.C., Murty K.G. Complementarity problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2000, vol. 124, no. 1–2, pp. 303–318.
16. Vereshchagin N.K., Shen' A. *Leksii po matematicheskoi logike i teorii algoritmov*. Ch. 2. *Yazyki i ischisleniya* [Lectures in mathematical logic and computability theory. Pt. 2. Languages and Calculi]. 4th ed. Moscow, MCCME Publ., 2012. 240 p.
17. Ben-Ari M. *Mathematical logic for computer science*. 3rd ed. London, New York, Springer, 2012. 364 p.
18. Tsvetkov V.Ya. Not transitive method preferences. *Journal of International Network Center for Fundamental and Applied Research*, 2015, vol. 3, iss. 1, pp. 34–42. DOI: 10.13187/jincfar.2015.3.34.
19. Baburin D.E. Ierarkhicheskii podkhod dlya avtomaticheskogo razmeshcheniya atsilicheskikh grafov [Hierarchical approach to automatic placement directed acyclic graphs]. *Sovremennyye problemy konstruirovaniya program* [Modern problems of program construction]. Novosibirsk, 2002, pp. 7–37.
20. Tsvetkov V.Ya. Information situation and information position as a management tool. *European researcher. Series A*, 2012, vol. 36 (12-10), pp. 2166–2170.
21. Rozenberg I.N. Informatsionnaya situatsiya kak slozhnaya sistema [Information situation as complex system]. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii – Educational Resources and Technologies*, 2017, no. 3 (20), pp. 69–77.
22. Ozherel'eva T.A. Informacionnoe sootvetstvie i informacionnyj morfizm v informacionnom pole [Information conformity and informational morphism in the information field]. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*, 2017, no. 4, pp. 86–92. (In Russian).
23. Nomokonova O.Yu. Vidy informatsionnykh sootvetstviy [Types of information correspondences]. *Slavyanskii forum – Slavic Forum*, 2018, no. 2 (20), pp. 44–49.
24. Tsvetkov V.Ya. Reshenie problem s ispol'zovaniem sistemnogo analiza [Solving problems using a systematic analysis]. *Perspektivy nauki i obrazovaniya – Perspectives of Science and Education*, 2015, no. 1, pp. 50–55.
25. Kudzh S.A. Sistemnyi podkhod [Systems approach]. *Slavyanskii forum – Slavic Forum*, 2014, no. 1 (5), pp. 252–257.
26. Shchennikov A.N. Komplimentarnost' slozhnykh vychislenii [Complementarity of complex computations]. *Slavyanskii forum – Slavic Forum*, 2018, no. 2 (20), pp. 118–123.

27. ISO/IEC 25010:2011. *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models*. Available at: <https://www.iso.org/standard/35733.html> (accessed 20.06.2019).

28. Mesarovic M.D., Takahara Y. *General systems theory: mathematical foundations*. New York, Academic Press, 1975 (Russ. ed.: Mesarovich M., Takakhara N. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy*. Moscow, Mir Publ., 1978. 311 p.).

Для цитирования:

Цветков В.Я. Комплементарные отношения // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 101–114. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-101-114.

For citation:

Tsvetkov V.Ya. Komplementarnye otnosheniya [Complementary relationships]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 101–114. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-101-114.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENTATION,
METROLOGY
AND INFORMATION-
MEASURING DEVICES
AND SYSTEMS

УДК 535-7

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-115-126

Экспериментальные исследования оптических резонансных систем Фабри–Перо с зеркалами полного внутреннего отражения*

А.С. СЫРНЕВА^а, Д.С. МИХАЙЛОВА^б

630108, РФ, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, Сибирский государственный университет геосистем и технологий

^а aleksandra-syrneva@yandex.ru ^б daria-83.ru

Практическое применение оптических резонаторов с гранями полного внутреннего отражения возможно в качестве узкополосных оптических фильтров, пригодных для исследования спектров лазерных излучателей, а также при разработках мощных миниатюрных твердотельных лазеров с повышенной оптической прочностью выходного зеркала. В статье представлены результаты экспериментального исследования характеристик разработанного оптического резонатора бегущей волны с зеркалами полного внутреннего отражения. Оптический резонатор представляет собой призму четырехгранной формы с длиной ребра 30 мм, изготовленную из стекла К8, плоскостность граней равна примерно 0,1 интерференционной полосы, погрешность выполнения углов между гранями – не более нескольких угловых секунд. Излучение вводится в оптический резонатор с помощью гелий-неонового лазера. Такой резонатор фактически представляет собой эталон Фабри–Перо с зеркалами ПВО. Отсутствие оптических потерь на зеркалах ПВО увеличило количество эффективных полных замкнутых траекторий в исследованном экспериментальном образце резонатора.

Полученные результаты подтверждают, что использование резонатора в виде четырехгранной призмы с полноотражающими гранями обеспечивает ему существенно меньшие оптические потери в сравнении с эталонами Фабри–Перо.

Практическое применение оптических резонаторов с гранями полного внутреннего отражения возможно в качестве узкополосных оптических фильтров, применимых для исследования спектров лазерных излучателей, а также при разработках мощных миниатюрных твердотельных лазеров с повышенной оптической прочностью выходного зеркала.

Ключевые слова: оптический резонатор, полное внутреннее отражение, многолучевая интерференция, оптическая призма, резонансная дифракция, световая волна, интерференционная картина, зеркала резонатора, полноотражающие грани

* Статья получена 11 января 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена разработке узкополосных многолучевых интерференционных оптических фильтров различных диапазонов спектра, зеркала которых обладают малыми потерями благодаря использованию эффектов полного внутреннего отражения (ПВО) света на границе прозрачных сред с различными показателями преломления.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы являются теоретические и экспериментальные исследования интерференционных эффектов в оптических резонансных системах Фабри–Перо с зеркалами полного отражения и разработка на их основе устройств многолучевой интерференционной спектроскопии с улучшенными разрешением и пропусканием в полосе пропускания.

В работе, являющейся продолжением [1–4], предлагается выполнить резонансный элемент структуры в виде резонатора бегущей волны типа «шепчущей галереи» с замкнутой траекторией волны (рис. 1). Излучение вводится в четырехгранный прозрачный резонатор через призмный элемент связи 2, отделенный от него воздушным зазором, который позволяет волне туннелировать в резонатор [5–8]. На гранях кубика волна испытывает полное внутреннее отражение, при угле преломления $\theta = \pi/4$ траектория волны замкнутая. Часть излучения выводится из резонатора через призму ввода 2. Основная часть излучения оптически туннелирует в призму 3 и выводится через нее. Волны выходят из резонатора в одном и том же месте его грани. Если траектория имеет замкнутый характер, то нет смещения волн и накопление электромагнитной энергии при резонансе не требует увеличения протяженности зеркальной структуры.

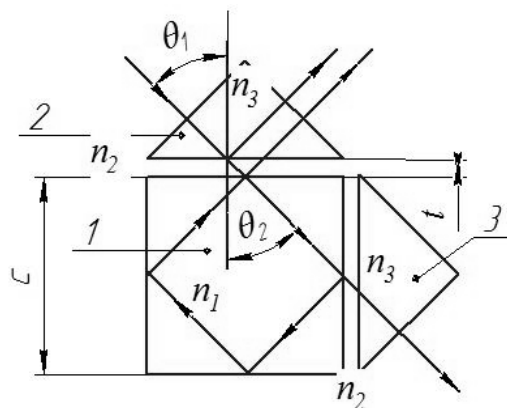


Рис. 1. Схема оптического резонатора полного внутреннего отражения

Fig. 1. Scheme of the optical resonator of total internal reflection

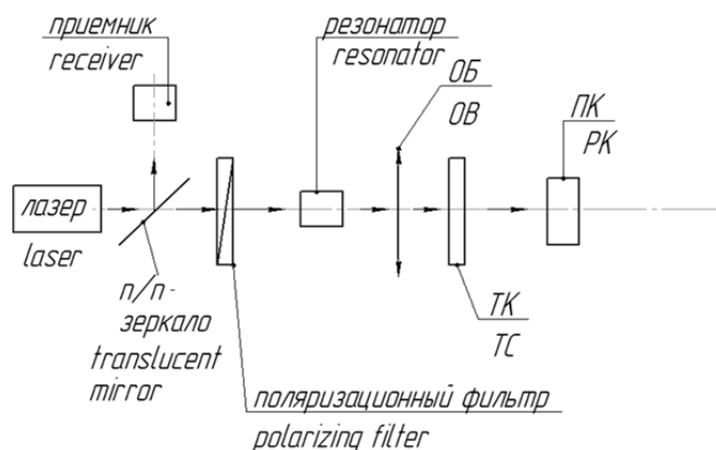


Рис. 2. Схема стенда для исследования оптического резонатора

Fig. 2. The scheme of the stand for studying the optical resonator

На рис. 2 представлена схема стенда для исследования оптического резонатора.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При экспериментальном исследовании характеристик разработанного оптического резонатора использовалось излучение непрерывного гелий-неонового лазера с шириной линии излучения порядка 1 нм. Полученная с помощью экспериментального стенда интерференционная картина была обработана в пакете прикладных программ Matlab.

С помощью этого пакета прикладных программ можно получить распределение интенсивности интерференционной картины, представленной на рис. 3, по строке, расположенной горизонтально.



Рис. 3. Изображение интерференционной картины при фокусном расстоянии камерного объектива 50 мм

Fig. 3. The image of an interference pattern at a camera lens focal length of 50 mm

При обработке экспериментальной зависимости интенсивности от номера пикселя фотоматрицы информация была сохранена в Excel и пересчитана в зависимость от координаты строки в фокальной плоскости (рис. 4).

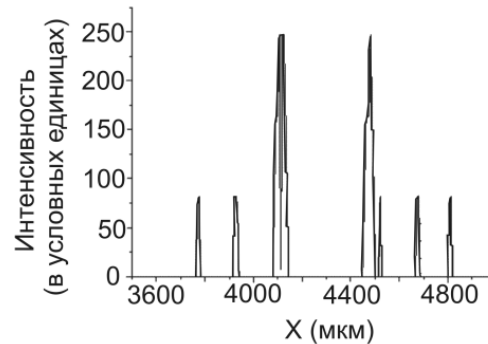


Рис. 4. График распределения интенсивности по строке интерференционной картины при фокусном расстоянии объектива 50 мм. Координата точек строки в мкм

Fig. 4. The plot of the intensity distribution along the line of the interference pattern at a lens focal length of 50 mm. The line point coordinate is in μm

Из графика следует, что диаметр первого кольца 0,4 мм, второго – 0,75 мм.

Из представленного графика можно определить важнейшие практические характеристики интерферометра:

– резкость F (отношение расстояния между полосами интерференционной картины к их полуширине) [9–15]

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}};$$

– максимальное пропускание

$$\tau = \left(\frac{I_t}{I_i} \right)_{\max};$$

– контрастность

$$\mathfrak{K} = \left(\frac{I_t}{I_i} \right)_{\min} / \left(\frac{I_t}{I_i} \right)_{\max},$$

где I_i – интенсивность падающего излучения, I_t – интенсивность прошедшего излучения в максимуме интерференционной картины.

Понаблюдаем на различных этапах юстировок интерференционные картины, полученные при исследовании спектра излучения гелий-неонового лазера с полосой линии спектра порядка $\delta\lambda \approx 0,1 \text{ нм}$. Характер изображений

зависит от юстировок интерференционного устройства и коэффициентов ослабления использованных светофильтров.

Исследована интерференционная картина, получаемая резонатором при использовании линзы с фокусным расстоянием 2 м (рис. 5).



Рис. 5. Изображение интерференционной картины при фокусном расстоянии камерного объектива 2 м

Fig. 5. Image of an interference pattern at a camera lens focal length of 2 m

Из рис. 5 видно, что интерференционная картина существенно отличается от классической интерференционной картины эталонов Фабри–Перо, характеризуется наличием пересечений световой полосы темными, имеет две периодичности картины интерференционных максимумов.

С помощью пакета прикладных программ Matlab был получен график распределения интерференционной картины по строке в микрометрах, представленный на рис. 6.

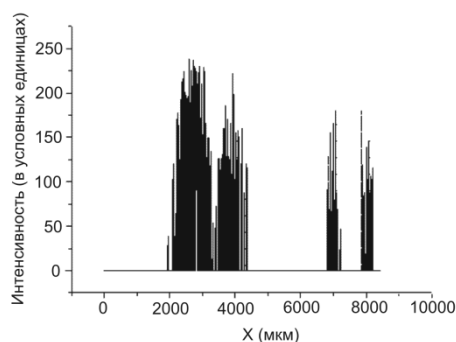


Рис. 6. График распределения интерференционной картины по строке в микрометрах при фокусном расстоянии объектива 2 м

Fig. 6. A graph of the distribution of the interference pattern along a line in micrometers at a lens focal length of 2 m

Результаты расчетов и экспериментальные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Теоретические и экспериментальные характеристики резонатора с полигональной призмой ($L_0 = 127,28$ мм)

Theoretical and experimental characteristics of a resonator with a polygonal prism ($L_0 = 127,28$ mm)

Характеристики	$f = 0,05$ м	$f = 2$ м
\mathcal{F}	300	30
$\Delta\lambda$, м	$4,2 \cdot 10^{-12}$	$4,2 \cdot 10^{-12}$
$\delta\lambda$, м	$1,4 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$
D_1 , мм	0,37	–
D_2 , мм	0,60	–
D_3 , мм	0,77	–
Δx , мкм	–	30,8
\mathcal{F}	324	10,31
$\Delta\lambda_{\text{жс}}$, м	$9,4 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$
$\delta\lambda$, м	$2,9 \cdot 10^{-14}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$
D_1 , мм	0,42	–
D_2 , мм	0,66	–
D_3 , мм	0,79	–
Δx , мкм	–	49

На рис. 7 представлена оптическая схема измерения коэффициента пропускания лазерного излучения оптическим резонатором.

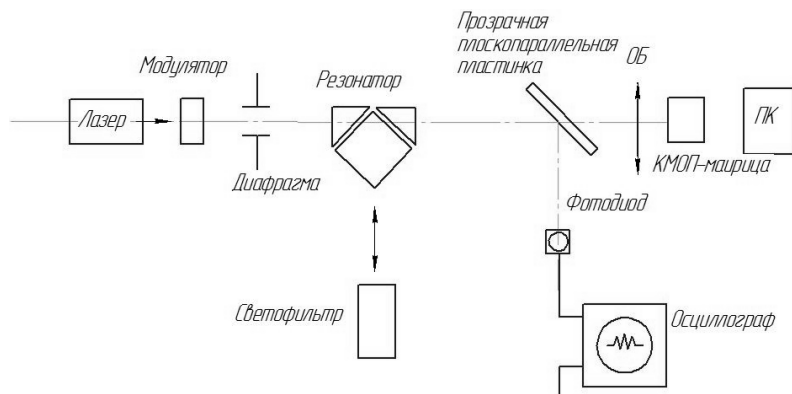


Рис. 7. Оптическая схема измерения коэффициента пропускания лазерного излучения оптическим резонатором

Fig. 7. Optical scheme for measuring the transmittance of laser radiation by an optical resonator

Луч лазера, пройдя модулятор и апертуру, попадает в резонатор. Потом с помощью прозрачной пластинки часть излучения отражается и попадает на фотодиод. Модулятор выполнен в виде электромеханической заслонки,

прерывающей ход излучения. Сигнал с фотодиода фиксируется осциллографом.

Если вместо резонатора на пути лазерного излучения установлен светофильтр, то к фотодиоду проходит световой поток мощностью $P_1 = K_1 K_2 I_0$, где I_0 – интенсивность лазерного излучения, K_1 и K_2 – коэффициенты пропускания светофильтра и прозрачной пластинки. Заменяв светофильтр на резонатор, получим $P_2 = K_2 K_3 I_0$, где K_3 – коэффициент пропускания резонатора.

Для определения коэффициента пропускания резонатора он убирался из схемы, а на его место подбирались светофильтры, обеспечивающие прежнюю величину сигналов на экране осциллографа.

Коэффициент пропускания резонатора был измерен при различных настройках положения призм ввода и вывода излучения. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты измерения коэффициента пропускания резонатора

Results of measuring the resonator transmittance

№ п/п	U_{1c}	U_{2c}	K_{ϕ}
$L = 28,28$ мм			
1	0,25	0,0225	0,09
2	0,25	0,0175	0,07
$L = 127,28$ мм			
1	0,25	0,075	0,30
2	0,25	0,625	0,25

Установлено, что коэффициент пропускания резонатора равен 0,09 ($L = 28,28$ мм) и 0,3 ($L = 127,28$ мм).

В связи с полученными экспериментальными результатами возникла необходимость исследовать четырехгранную призму, выполняющую роль резонатора на параллельность сторон. Непараллельность граней призмы была исследована с помощью гониометра Г5М, полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Погрешности углов четырехгранной призмы со стороной 10 мм

Errors of angles of a four-sided prism with a side of 10 mm

Грань призмы	Угол отклонения грани, градусы / радианы
1	0°2'17" / 0,0007
2	0°1'48" / 0,0005
3	0°1'55" / 0,0006
4	0°2'42" / 0,0008

Также был исследован оптический резонатор, состоящий из входной и выходной призмы и четырехгранной призмы со сторонами 30 мм.

В табл. 4 приведены данные по погрешности изготовления четырехгранной призмы со стороной 30 мм.

Таблица 4

Table 4

Погрешности углов четырехгранной призмы со стороной 30 мм

Errors of angles of a tetrahedral prism with a side of 30 mm

Грань призмы	Угол отклонения грани, градусы / радианы
1	0°0'3,24" / 0,0000157
2	0°0'3,96 / 0,0000191
3	0°0'3,24" / 0,0000157
4	0°0'3,96 / 0,0000191

Также была исследована зависимость пропускания четырехгранного резонатора от времени нагрева резонатора. Излучение от лазера попадало на четырехгранный резонатор, состоящий из входной и выходной призм и призмы квадратного сечения со стороной 30 мм. Далее устанавливался объектив, в фокальной плоскости которого устанавливалась камера, формирующая изображение, которое передавалось на монитор компьютера. В ходе эксперимента сверху на резонатор устанавливался металлический стакан с водой, температура которой была 100 °С, за счет чего происходил нагрев резонатора. На рис. 8 представлена зависимость интенсивности выходящего из резонатора излучения от времени нагрева.

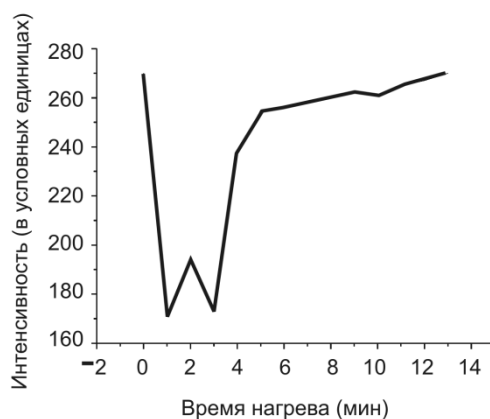


Рис. 8. Зависимость интенсивности от нагрева резонатора

Fig. 8. Dependence of intensity on the resonator heating

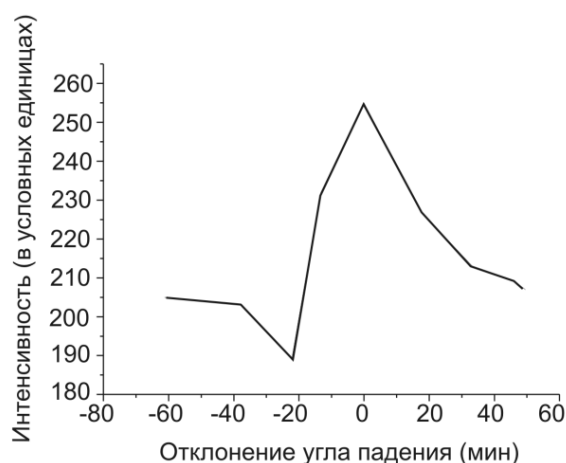


Рис. 9. График зависимости интенсивности от угла поворота резонатора

Fig. 9. Intensity versus the resonator rotation angle

Также исследовалась зависимость изменения интенсивности резонатора от угла поворота резонатора (рис. 9). Резонатор, установленный на столике гониометра, поворачивался относительно падающего излучения на 1° по часовой стрелке и против часовой стрелки от нормального угла падения лазерного излучения на входную грань призмы резонатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как представляется авторам, рассматриваемый оптический резонатор может быть применен в качестве резонаторов лазерных излучателей, так как отсутствие потерь в зеркалах резонаторов позволит увеличить выводимую через зеркала мощность генерируемого излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сырнева А.С. Краевой эффект в фильтрах терагерцового диапазона, использующих нарушенное полное внутреннее отражение // ГЕО-Сибирь – 2010: сборник материалов VI Международного научного конгресса. – Новосибирск, 2010. – Т. 5, ч. 2. – С. 85–89.
2. Чесноков В.В., Сырнева А.С., Чесноков Д.В. Оптические резонаторы полного внутреннего отражения с бегущей волной // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы X Международной конференции АПЭП-2010. – Новосибирск, 2010. – Т. 7. – С. 95–97.
3. Патент 2455669 Российская Федерация. Оптический резонатор / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева. – № 2010143257/28; заявл. 21.10.2010; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.
4. Сырнева А.С., Райхерт В.А. Оптический резонатор полного внутреннего отражения с возможностью компенсации угловых положений его граней // СибОптика – 2014: сборник материалов X Международного конгресса. – Новосибирск, 2014. – Т. 1. – С. 113–116.
5. Кард П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. – Таллин: Валгус, 1971. – 233 с.

6. Иогансен Л.В. Резонансная дифракция волн в слоисто-неоднородных средах // ЖЭТФ. – 1961. – Т. 40, вып. 6.
7. Иогансен Л.В. Теория резонансных электромагнитных систем с полным внутренним отражением // ЖТФ. – 1962. – Т. 32., вып. 4. – С. 406–418.
8. Иогансен Л.В., Глобенко Ю.В. Теория резонансных слоисто-неоднородных сред электромагнитных систем с полным внутренним отражением // Известия вузов. Радиофизика. – 1976. – Т. 19, № 2. – С. 256–262.
9. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. – М.: Физматлит, 1958. – 570 с.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 855 с.
11. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика: учебник. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 656 с.
12. Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
13. Терентьев В.С. Численное моделирование волоконного отражательного дифракционного интерферометра // Автометрия. – 2012. – № 4. – С. 41–54.
14. Голдина Н.Д. Расчет коэффициента отражения металл-диэлектрических структур при нарушенном полном внутреннем отражении // Автометрия. – 2009. – № 12. – С. 99–104.
15. Патент 1265678 СССР. Интерференционный фильтр полного внутреннего отражения / Г.Б. Шоломицкий. – № 3908062; заявл. 11.06.1985; опубл. 23.10.1986.

Сырнева Александра Сергеевна, старший преподаватель кафедры физики Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Область научных интересов – многолучевая интерференция. E-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru.

Михайлова Дарья Сергеевна, старший преподаватель кафедры физики Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Область научных интересов: многолучевая интерференция, спектроскопия. E-mail: daria-83@mail.ru.

Syrneva Alexander S., senior lecturer at the department of Physics Siberian State University of Geosystems and Technologies. The area of his scientific interests includes multiple-beam interference and spectroscopy. E-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru.

Mikhailova Daria S., senior lecturer at the department of Physics. The area of her scientific interests covers multiple-beam interference and spectroscopy. E-mail: daria-83@mail.ru.

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-115-126

Experimental research into optical resonance of Fabry–Perot systems with total internal reflection mirrors*A.S. SYRNEVA^a, D.S. MIKHAILOVA^b*Siberian State University of Geosystems and Technologies; 10, Plakhotny Street, Novosibirsk, 630108, Russian Federation*^a *aleksandra-syrneva@yandex.ru* ^b *daria-83.ru***Abstract**

Practical application of optical resonators with full internal reflection edges is possible as narrow-band optical filters suitable for studying the spectra of laser emitters, as well as for the development of powerful miniature solid-state lasers with increased optical strength of the output mirror. In this article, we present the results of an experimental study of the characteristics of the developed traveling-wave optical resonator with mirrors of total internal reflection (TIR). The optical resonator is a prism of a quadrangular shape with a rib length of 30 mm made of the K8 glass, the flatness of the faces is approximately 0.1 interference fringe, an error in performing angles between the faces is not more than a few angular seconds. Radiation is introduced into the optical resonator, using a helium-neon laser. Such a resonator, in fact, is a Fabry-Perot etalon with TIR mirrors. The absence of optical losses on the TIR mirrors increased the number of effective complete closed trajectories in the experimental resonator sample studied.

The obtained results confirm that the use of a resonator, in the form of a four-faceted prism with fully reflecting facets, provides it with substantially less optical losses than Fabry-Perot etalons.

Practical applications of optical resonators with full internal reflection edges are possible as narrow-band optical filters applicable for studying the spectra of laser emitters, as well as for the development of powerful miniature solid-state lasers with increased optical strength of the output mirror.

Keywords: optical resonator, full internal reflection, multi-beam interference, optical prisms, resonant diffraction, light wave, interferential picture, the resonator mirrors, full-reflecting facet

REFERENCES

1. Syrneva A.S. [Regional effect in of terahertz radiation filters using the effect of broken total internal reflection]. *GEO-Sibir' – 2010: sbornik materialov VI Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* [GEO-Siberia – 2010. Collection of materials of the VI International Scientific Congress]. Novosibirsk, 2010, vol. 4., pt. 1, pp. 85–89. (In Russian).
2. Chesnokov V.V., Syrneva A.S., Chesnokov D.V. [Optical resonators of total internal reflection with a traveling wave]. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya: materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii APEP-2010* [Proceedings of 10th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2010)]. Novosibirsk, 2010, vol. 7, pp. 95–97. (In Russian).
3. Chesnokov V.V., Chesnokov D.V., Syrneva A.S. *Opticheskii rezonator* [Optical resonator]. Patent RF, no. 2455669, 2012.
4. Syrneva A.S., Reichert V.A. [Optical resonator of total internal reflection with who options angular provisions of its faces]. *SibOptika – 2014: sbornik materialov X Mezhdunarodnogo kongressa* [SibOptika 2014 International Conference: a collection of materials]. Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 113–116. (In Russian).

* Received 11 January 2019.

5. Card P.G. *Analiz i sintez mnogoslownykh interferentsionnykh plenok* [Analysis and synthesis of multilayer interference films]. Tallinn, Valgus Publ., 1971. 233 p. (In Russian).
6. Johansen L.V. Rezonansnaya difraktsiya voln v sloisto-neodnorodnykh sredakh [Resonance diffraction of waves in layered-inhomogeneous media]. *Zhurnal eksperimental'noi i teore-ticheskoi fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1961, vol. 40, iss. 6.
7. Johansen L.V. Teoriya rezonansnykh elektromagnitnykh sistem s polnym vnutrennim otrazheniem [The theory of resonant electromagnetic systems with total internal reflection]. *Zhurnal Tehnicheskoy Fiziki – Soviet Physics: Technical Physics*, 1962, vol. 32, iss. 4, pp. 406–418.
8. Johansen L.V., Globenko Yu.V. Teoriya rezonansnykh sloisto-neodnorodnykh sred elektromagnitnykh sistem s polnym vnutrennim otrazheniem [Theory of resonance of layered non-uniform environments electromagnetic systems with total internal reflection]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika – Radiophysics and Quantum Electronics*, 1976, vol. 1, no. 2, pp. 256–262. (In Russian).
9. Rozenberg G.V. *Optika tonkosloinykh pokrytii* [Optics of thin-layer coatings]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1958. 570 p.
10. Born M., Wolf E. *Osnovy optiki* [Principles of optics]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p. (In Russian).
11. Akhmanov S.A., Nikitin S.Yu. *Fizicheskaya optika* [Physical optics]. Moscow, MSU Publ., 1998. 656 p.
12. Skokov I.V. *Mnogoluchevye interferometry v izmeritel'noi tekhnike* [Multibeam interferometers in measurement technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 256 p.
13. Terent'ev V.S. Chislennoe modelirovanie volokonnoogo otrazhatel'nogo difraktsionnogo interferometra [Numerical simulation of a reflective diffraction fiber interferometer]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, no. 4, pp. 41–54. (In Russian).
14. Goldina N.D. Raschet koeffitsienta otrazheniya metall-dielektricheskikh struktur pri naru-shennom polnom vnutrennem otrazhenii [Calculation of the reflection coefficient of metal-dielectric structures in the disturbed total internal reflection]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, no. 12, pp. 99–104. (In Russian).
15. Sholomitskii G.B. *Interferentsionnyi fil'tr polnogo vnutrennego otrazheniya* [Interference filter of total internal reflection]. Patent SU 1265678, 1986.

Для цитирования:

Сырнева А.С., Михайлова Д.С. Экспериментальные исследования оптических резонансных систем Фабри–Перо с зеркалами полного внутреннего отражения // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 115–126. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-115-126.

For citation:

Syrneva A.S., Mikhailova D.S. Eksperimental'nye issledovaniya opticheskikh rezonansnykh sistem Fabri-Pero s zerkalami polnogo vnutrennego otrazheniya [Experimental researches of optical resonance Fabry–Pero systems with mirrors of full internal reflection]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 115–126. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-115-126.

УДК 621.315.3:621.316.99

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-127-140

Учет энергии частичных разрядов в математической модели термофлуктуационных процессов силового кабеля^{*}

М.Н. ДУБЯГО^а, Н.К. ПОЛУЯНОВИЧ^б, Д.В. БУРЬКОВ^с

347922, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Южный федеральный университет

^а w_m88@mail.ru ^б nik1-58@mail.ru ^с bdv-76@yandex.ru

Показано, что наличие примесей либо продуктов окисления, возникающих в результате нагрева в изоляции, приводит к возникновению токов утечки. Получена формула расчета мощности, выделяемой активной составляющей тока утечки. Получена математическая модель, позволяющая рассчитать мощность ЧР, а также определить расположение включения m_1 в основной изоляции, обусловленное мощностью активной составляющей тока утечки при его возникновении в основной изоляции кабеля.

Расчет изменения теплового потока, проходящего через слои изоляции кабеля, проводится в зависимости от радиальных расстояний методом кусочно-заданных функций с учетом теплового сопротивления включения. Предлагаемая математическая модель (7) позволяет наряду с послойным расчетом изотерм в поперечном сечении кабеля определять наличие включений в изоляционном материале. Предлагаемая математическая модель учитывает тепловые потери, вызванные ЧР в изоляции кабеля, и их влияние на профиль распределения температур в характерных точках сечения СКЛ. Методика, предлагаемая в разработанной модели, позволяет проводить учет тепловых потерь на основе тепловых и геометрических размеров включения, что не было учтено в указанных выше моделях. Это позволит получить температуру по всем слоям СКЛ, отталкиваясь от радиальных расстояний, параметров включения, обуславливаемых током жилы изоляции, как основных температурообразующих факторов.

Разработано программное обеспечение «Система измерения и расчета термофлуктуационных характеристик СКЛ (SMaCTC)» [1], основанное на математической модели температурного поля в сечении кабеля. Программное обеспечение отличается от существующих возможностью послойного контроля термофлуктуационных процессов по значению температуры на поверхности кабеля.

Ключевые слова: энергия частичных разрядов, термофлуктуационные процессы, изоляционные материалы, силовые кабели, ток утечки, тепловые потери, износ, прогнозирование, неразрушающий метод контроля

* Статья получена 16 января 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные случаи выхода из строя силового кабеля как важнейшего элемента системы электроснабжения из-за превышения допустимой температуры делают задачу анализа его теплового режима весьма актуальной. Температура является одним из основных факторов, обуславливающих износ изоляции. На стадии проектирования силовых кабельных линий (СКЛ) по методике, изложенной в IEC 60287, определяют их пропускную способность, учитывая все возможные факторы, возникающие при эксплуатации; выбирают коэффициенты, обеспечивающие запас по нагреву, поэтому в ряде случаев кабели оказываются недогруженными, а иногда работают на пределе термической стойкости.

В соответствии с общими представлениями о разрушении изоляции определяющими должны быть либо энергия единичного частичного разряда (ЧР) $W_{\text{ЧР}}$, либо мощность разрядов и $P_{\text{ЧР}}$. В изоляции может развиваться тепловой пробой [2], связанный с разогревом диэлектрика при протекании тока проводимости и развитием диэлектрических потерь [3]. Однако непосредственное измерение $P_{\text{ЧР}}$ и $W_{\text{ЧР}}$ в большинстве случаев практически невозможно, так как они очень малы. Количество выделяемого в диэлектрике тепла пропорционально диэлектрическим потерям.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенный обзор литературных источников в области исследований термофлуктуационных процессов на основе тепловых схем замещения СКЛ показал, что при разработке математических моделей анализа активных потерь, влияющих на состояние основной изоляции кабеля, учитывались электродинамические усилия жил и собственного электромагнитного поля, приводящие к нагреву изоляции и, как следствие, к возникновению токов утечки. Было показано, что, несмотря на существенное различие в рабочих режимах, происходит их комбинированное воздействие на изоляцию кабеля [4]. В работе Зайцева Е.С. и других авторов [5] была разработана математическая модель распределения температуры в высоковольтном экранированном кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена, позволяющая проводить анализ, зная лишь его тепловые характеристики и условия окружающей среды. Однако ни одна из рассмотренных математических моделей не учитывает тепловые потери, вызванные ЧР в изоляции СКЛ, и их влияние на профиль распределения температур в характерных точках сечения СКЛ. В связи с этим актуальной является задача исследования влияния на изотермические характеристики СКЛ, градиента температур включений в основной изоляции.

В кабелях с встроенным оптоволоконным продольным датчиком температуры [4] измеряется нагрев поверхности по всей его длине, так как оптоволоконно находится в защитной оболочке или в экране кабеля. Измерить температуру наиболее нагретой точки кабеля (жилы), где и происходит наиболее интенсивный тепловой износ изоляции, можно только косвенным методом. Поэтому важной задачей являются исследования в области косвенного изме-

рения температуры на основе математической модели тепловых процессов, которые могут быть использованы в алгоритмах программного обеспечения устройств непрерывного диагностирования силовых кабелей.

2. ПОСЛОЙНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР КАБЕЛЯ

2.1. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЧР, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ТОКОМ УТЕЧКИ

Тепловые процессы в СКЛ вызваны активными потерями (рис. 1) которые преобразуются в тепловой поток, проходящий от жил через диэлектрик к внешней среде.

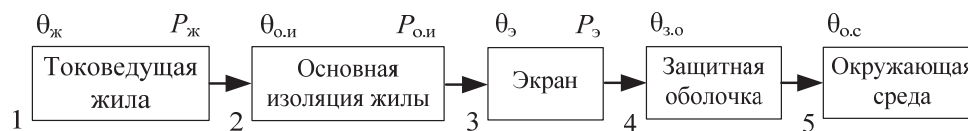


Рис. 1. Структурная схема тепловых процессов кабеля

Fig. 1. Structural diagram of the cable thermal processes

Мощность электрических потерь в жилах кабеля определяется по известной формуле:

$$P_{эл} = I^2 R . \tag{1}$$

Активная мощность преобразуется в тепловой поток [5]

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta L} S t . \tag{2}$$

Изменение теплового потока, проходящего через слой изоляции кабеля в единицу времени, также представляет собой активную мощность и измеряется в [Вт]:

$$P_Q = \frac{dQ}{dt} . \tag{3}$$

Здесь Q – количество теплоты, переданное через слой вещества толщиной ΔL и площадью S при поддержании на его плоскостях разности температур ΔT за время t ; λ – удельная теплопроводность материала [8, 9].

Процессы разрушения изоляции под действием теплового потока подробно исследованы, например, в работе [10]. Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов, связанных с наличием примесей, либо продуктов окисления, возникающих в результате нагрева в изоля-

ции, приводит к возникновению токов утечки, определяемых в общем случае равенством [9]:

$$I_y = U\omega C, \quad (4)$$

где U – напряжение между слоями диэлектрика; ω – угловая частота тока; C – емкость между слоями диэлектрика.

Расчет изменения теплового потока, проходящего через слои изоляции кабеля, проводится в зависимости от радиальных расстояний методом кусочно-заданных функций, в котором учитывается место расположения дефекта основной изоляции (m_1). Оно зависит от степени нагрева жилы и тепловых свойств основной изоляции (о.и). Радиальные расстояния считаются от центра жилы, что позволяет получить картину распределения градиента температур.

Мощность, выделяемую активной составляющей тока утечки, можно рассчитать по формуле

$$P_B = P_{Bt} + \frac{I_{ж}^2}{S_{ж}\gamma_{ж}} + \frac{I_{в}^2}{S_{в}\gamma_{в}} \ln\left(\frac{m_1}{h_{ж}}\right) + \frac{I_{в}^2}{S_{в}\gamma_{в}\lambda_{в}} (h_{ж}^2 - h^2), \quad (5.1)$$

$$P_{Bt} = P_{гр} + \frac{I_{ж}^2}{2\pi\lambda_{о.и}S_{ж}\gamma_{ж}} \ln\left(\frac{h_{о.и}}{m_1}\right), \quad (5.2)$$

где h – радиальное расстояние (переменная); $h_{ж}$ – радиус внешнего края основной изоляции; m_1 – место расположения дефекта; $S_{ж}$ – площадь сечения жилы; $\delta_{в}$ – плотность тока включения; $h_{в}$ – размер включения; $\lambda_{в}$ – теплопроводность включения; $\gamma_{в}$ – проводимость включения; $\gamma_{ж}$ – проводимость жилы; $h_{о.и}$ – внешний радиус основной изоляции; $\lambda_{о.и}$ – теплопроводность основной изоляции; $P_{гр}$ – тепловой поток на границе включения и основной изоляции.

Плотность тока

$$\delta_{в} = \frac{I_y}{S_{в}} = \frac{U\omega C_{в}}{S_{в}}.$$

Емкость включения

$$C_{в} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{в} \frac{h_{в}}{2},$$

где $h_{в}$ – размер включения.

Тепловое сопротивление включения

$$R_B = \frac{1}{\gamma_B} = \frac{1}{qN_{UD}(\mu_+ + \mu_-)},$$

где γ_B – тепловая проводимость; N_{UD} – удельное число частиц ($N_{UD} = 2.6786e + 25$); μ_+ , μ_- – подвижности положительно и отрицательно заряженных частиц.

Объем включения

$$U_B = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{h_B}{2}\right)^3.$$

Напряжение на включении

$$U_B = \varepsilon_B \varepsilon_0 \left(\frac{h_B}{h}\right),$$

$$h = h_{o.и} - h_{ж}.$$

где h – радиальное расстояние основной изоляции.

Площадь поверхности включения

$$S_B = \frac{\pi h_B^2}{4}.$$

Заряд включения

$$q = \frac{U \varepsilon_0 \varepsilon_B S_B}{h_{o.и} - h_{ж} - h_B}.$$

Для определения места расположения ЧР в систему расчета температур (7) введено выражение

$$m_1 = h_{ж} + \frac{I_{НОМ}}{I_t}(h_{ж} - h_{o.и}), \quad (6)$$

где $I_{НОМ}$ – ток жилы номинальный; I_t – ток жилы в настоящий момент времени.

Таким образом, полученная математическая модель позволяет рассчитать мощность ЧР, а также определить расположение включения m_1 (6) в основной изоляции, обусловленное мощностью активной составляющей тока утечки (5.2), при его возникновении в основной изоляции кабеля.

2.2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для мониторинга термофлуктуационных процессов в СКЛ используется метод встроенных датчиков температуры [12]. Рассмотрим силовую кабель как систему из следующих тепловых однородных тел: токопроводящая жила, основная изоляция, экран, защитная оболочка, внешняя охлаждающая среда (рис. 2, где $\theta_{ж}$, $\theta_{о.и}$, $\theta_{э}$, $\theta_{з.о}$, $\theta_{о.с}$, $\theta_{в}$ – соответственно, температуры однородных тел: токоведущей жилы, основной изоляции жилы, экрана, защитной оболочки, окружающей среды и включения ($^{\circ}\text{C}$); $C_{ж}$, $C_{э}$, $C_{о.и}$, $C_{з.о}$, $C_{о.с}$, $C_{в}$ – теплоемкости соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки, окружающей среды и включения; $R_{ж}$, $R_{э}$, $R_{о.и}$, $R_{з.о}$, $R_{в}$ – тепловые сопротивления соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки и включения; $Q_{ж}$, $Q_{в}$, $Q_{э}$ – источники тока, замещающие температурный напор, создаваемый током жилы (потери активной мощности в токоведущей жиле), во включении и на экране.

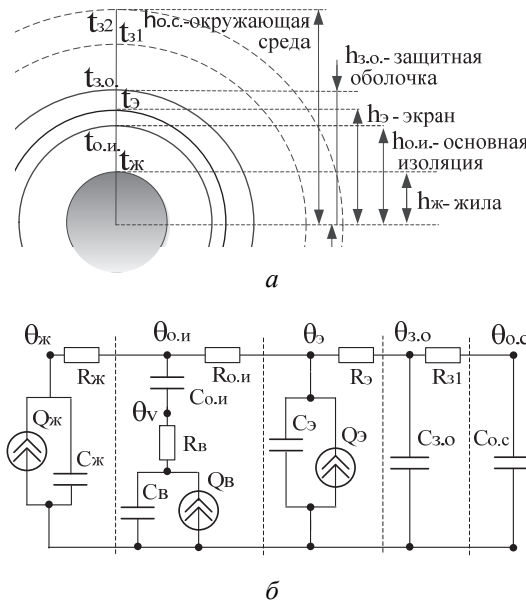


Рис. 2. Сечение кабеля и его тепловая схема замещения

Fig. 2. Cable cross-section and its thermal replacement scheme

В работе [7] кабель для расчета его тепловых процессов рассматривается как система однородных тел. Однако данная модель не учитывает такой фактор, как влияние на нагрев кабеля, т. е. диэлектрические потери в изоляции, а именно ЧР. Предлагаемая математическая модель (7) позволяет наряду с послойным расчетом изотерм в поперечном сечении кабеля (рис. 3) определять наличие включений в изоляционном материале. Расчет выделяемого в изоляционном материале (диэлектрике) тепла $Q_{о.и}$, пропорционального диэлектрическим потерям во включениях (энергия частичных разряда $W_{чр}$),

производится по аналогии расчета выделяемого тепла Q в жиле (экране) [7], но только с учетом мощности, выделяемой активной составляющей тока утечки:

$$\theta(h) = \left\{ \begin{array}{l} \theta_{0,c} + \frac{\left(\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right)}{2\pi h \chi} \quad (h = h_{0,c}), \\ \theta(h_{0,c}) + \ln\left(\frac{h_{0,c}}{h}\right) \frac{\left(\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right)}{2\pi \lambda_{0,c}} \quad (h_{3,0} \leq h \leq h_{0,c}), \\ \theta(h_{3,0}) + \ln\left(\frac{h_{3,0}}{h}\right) \frac{\left(\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right)}{2\pi \lambda_{0,и}} \quad (h_{э} \leq h \leq h_{3,0}), \\ \theta(h_{э}) + \ln\left(\frac{h_{э}}{h}\right) \frac{\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} - \frac{j_{э}^2}{\gamma_{э}} h_{0,и}^2 \pi}{2\pi \lambda_{э}} + \frac{j_{э}^2 (h_{э}^2 - h^2)}{4\lambda_{э} \gamma_{э}} \quad (h_{0,и} \leq h \leq h_{э}), \\ \theta(h_{0,и}) + \ln\left(\frac{h_{0,и}}{h}\right) \frac{\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}}}{2\pi \lambda_{0,и}} + \frac{j_{0,и}^2 (h_{0,и}^2 - h^2)}{4\lambda_{0,и} \gamma_{0,и}} \quad (m_1 + 2r_{в} \leq h \leq h_{0,и}), \\ \theta(h_{гр}) + \frac{\left(\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{в}^2}{\gamma_{в} S_{в}} \right) \ln\left(\frac{m_1}{h_{ж}}\right)}{2\pi \lambda_{в}} + \frac{I_{в}^2 (h_{ж}^2 - h^2)}{\gamma_{в} S_{в} \lambda_{в}} + \frac{I_{ж}^2 \ln\left(\frac{h_{0,и}}{m_1}\right)}{2\pi \lambda_{ж} \gamma_{ж} S_{ж}} \\ (m_1 \leq h \leq m_1 + h_{в}), \\ \theta(h_{0,и}) + \ln\left(\frac{h_{0,и}}{h}\right) \frac{\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}}}{2\pi \lambda_{0,и}} + \frac{j_{0,и}^2 (h_{0,и}^2 - h^2)}{4\lambda_{0,и} \gamma_{0,и}} \quad (h_{ж} \leq h \leq m_1), \\ \theta(h_{ж}) + \frac{j_{ж}^2 (h_{ж}^2 - h^2)}{4\lambda_{ж} \gamma_{ж}} \quad (0 \leq h \leq h_{ж}). \end{array} \right. \quad (7)$$

Профиль температур в сечении исследуемого силового кабеля АПвПу г-1х30/25-10 определялся системой уравнений (7) в соответствии с теорией теплопроводности (рис. 2), где $I_{ж}$, $I_{э}$ – токи в жиле и экране; χ – коэффициент теплопроводности $a = \lambda/c \cdot p$ [m^2/c]; $j_{ж} = I_{ж} / S_{ж}$; $j_{э} = I_{э} / S_{э}$; $S_{ж}$, $S_{э}$ – площади поперечного сечения жилы и экрана; $\gamma_{ж}$, $\gamma_{э}$ – электропроводности жилы и экрана; $\delta_{0,и} = I_{y} / S_{0,и} = U \omega C_{0,и} / S_{0,и}$.

2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В соответствии с системой уравнений (7) в Matlab построен градиент температур в сечении кабеля и окружающей среды. Расчеты выполнены при токе в жиле кабеля до 640 А. Ток в оболочке кабеля определяется режимом работы кабеля (током жилы), был принят 60 % от тока жилы. Физические свойства материалов и геометрические размеры элементов кабеля АПВПу г-1х30/25-10 сведены в таблице.

Параметры кабеля

Cable parameters

Параметр	Материал	Алюминий	СПЭ	Медь	Воздух
	Удельная теплопроводность (Вт/(м · К))		209.3	0.38	400
Плотность (кг/м ³)		2700	2200	8700	1.2
Удельная теплоемкость (Дж/(кг · К))		920	1900	385	1005
Электропроводность (См/м)		$31,75 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^7$	–

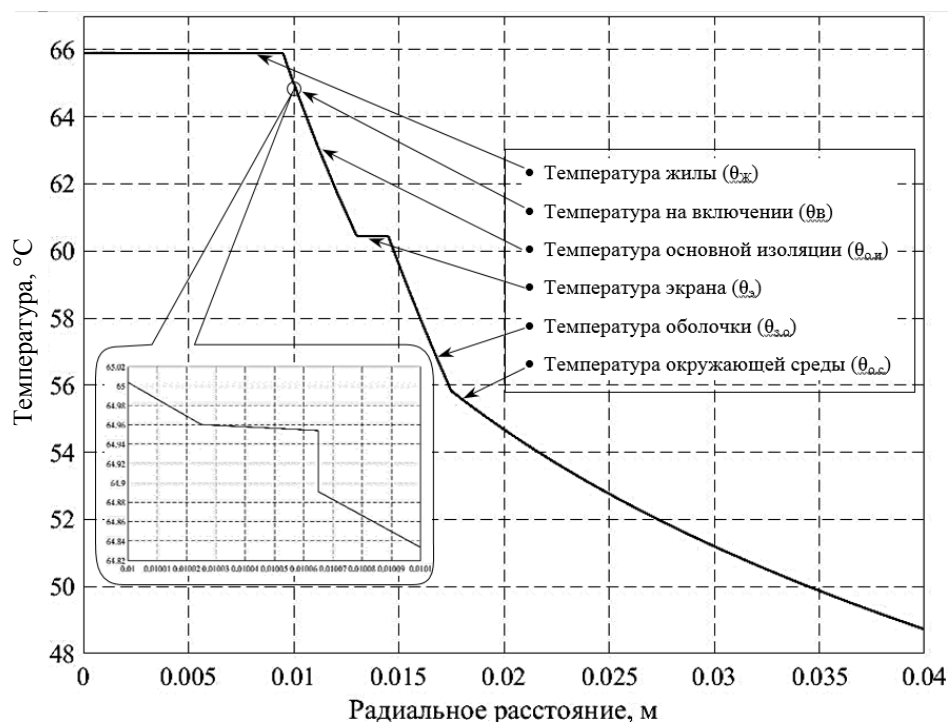


Рис. 3. Графики распределения температуры в характерных точках сечения КЛ

Fig. 3. Graphs of the temperature distribution in the characteristic points of the CL cross-section

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ полученных изотермических зависимостей высокотеплопроводных элементов (жила и экран кабеля) показывает их слабую зависимость от изменения температуры (горизонтальные полки на графике). Температурный градиент, полученный в изоляционном материале (СПЭ-кабель), подтверждает их незначительную теплопроводность. Значительная разница между измеренной температурой ($\theta_{3,0}$) и температурой на жиле кабеля вызывает необходимость перерасчета температуры поверхности кабеля ($\theta_{3,0}$) в температуру жилы ($\theta_{ж}$). То есть достаточно определить температурное поле на поверхности кабеля ($\theta_{3,0}$), а затем на основании системы уравнений теплопроводности (7) получить температуру по всем слоям кабеля.

Исследование полученного профиля распределения температур показало возможность моделирования наряду с температурным полем кабеля, потерь во включениях (энергии частичных разряда $W_{чр}$). Так, из рис. 3 видно наличие включений в изоляционном материале, их количество и расположение в диэлектрике, что свидетельствует о тепловом износе изоляции, обусловленном мощностью (5.2) определяемой активной составляющей тока утечки, и наблюдается вблизи жилы кабеля. В сравнении с [3, 4] предлагаемая математическая модель учитывает тепловые потери, вызванные ЧР в изоляции СКЛ и их влияние на профиль распределения температур в характерных точках сечения СКЛ. Методика, предлагаемая в разработанной модели, позволяет проводить учет тепловых потерь на основе тепловых и геометрических размеров включения, что не было учтено в указанных выше моделях. Это позволит получить температуру по всем слоям СКЛ, отталкиваясь от радиальных расстояний, параметров включения, обусловленных током жилы изоляции как основным температурообразующим фактором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* «Система измерения и расчета термофлуктуационных характеристик силовых кабельных линий (SMaСТС)»: свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ. – № 2018612492 от 16.02.2018.
2. *Меркулов В.И.* Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 156 с.
3. *Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С.* Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 367 с.
4. *Коржов А.В., Томашева Е.В.* Энергетическая диаграмма силового кабеля для анализа активных потерь, влияющих на состояние изоляции // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2008. – № 11. – С. 29–31.
5. Моделирование тепловых процессов в кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена средствами Matlab и Simulink / Е.С. Зайцев, В.В. Корольков, В.Д. Лебедев, В.В. Можжухина //

Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB : труды V Международной научной конференции. – Харьков, 2011. – С. 615–622.

6. Широков О.Г., Зализный Д.И. Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств // Наукоемкие технологии. – 2008. – № 2. – С. 63–67.

7. Яворский Б.М., Детлаф А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М.: Наука, 1979.

8. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1974.

9. Основы кабельной техники: учебник для студентов высших учебных заведений / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Академия, 2006. – 432 с.

10. Основы кабельной техники / В.А. Привезенцев, И.И. Гроднев, С.Д. Холодный, И.Б. Рязанов; под ред. В.А. Привезенцева. – М.; Л.: Энергия, 1967.

11. IEC 60034-1: 2004. Rotating electrical machines. Pt. 1. Rating and performance. – 137 p.

12. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Термофлуктуационный метод диагностики состояния изоляционных материалов СКЛ и прогнозирование их остаточного ресурса // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 66–71.

13. Дубяго М.Н., Пишихонов В.Х., Полуянович Н.К. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7. – С. 230–237.

14. Горелова В.Л., Мельникова Е.Н. Основы прогнозирования систем. – М.: Высшая школа, 1986. – 267 с.

15. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Термодинамический способ выявления деструкции изоляции в задачах диагностики и прогнозирования ресурса кабельных систем // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3 (46). – С. 25.

16. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишихонов В.Х. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 117–127.

17. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and power supply systems // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. – 2018. – Vol. 5 (16). – P. 1–4.

18. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration // International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering 2015 (AEECE 2015). – Amsterdam: Atlantis Press, 2015. – P. 49–54.

19. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 229. – P. 012036.

20. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Estimation of insulating materials depreciation and forecasting the residual cable resource considering the current core temperature // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2019. – Vol. 7, N 1. – P. 415–420.

Дубяго Марина Николаевна, ассистент Южного Федерального университета. Область научных интересов: разработка алгоритмов математического моделирования, исследования и обеспечения надежности систем энергоснабжения и автоматизированных устройств на их основе, а именно поиск новых и совершенствование существующих методов и средств непрерывного контроля и диагностики неисправностей в силовых кабельных линиях, а также теоретические основы исследования тенденций и прогнозирования развития систем энергоснабжения. E-mail: w_m88@mail.ru

Полюянович Николай Константинович, доцент Южного федерального университета. Область научных интересов: электротехника, разработка методов эквивалентного преобразования линейных и нелинейных схем замещения электрических цепей и создание алгоритмов автоматизации методов синтеза схем, разработка методов прогнозирования состояния изоляции силового электрооборудования по режимным параметрам энергосети, исследование нанокompозитных газочувствительных материалов методом импедансной спектроскопии, математические методы исследования режимов и устойчивости электроэнергетических систем. Имеет более 10 авторских свидетельств и патентов РФ и более 100 научных публикаций. E-mail: nik1-58@mail.ru

Бурьков Дмитрий Владимирович, доцент Южного федерального университета. Область научных интересов: компьютерные технологии дистанционного образования в области технических специальностей, дидактика и методика образовательного процесса, моделирование систем электроснабжения, электроприводов и других объектов электроэнергетики. Имеет более 40 научных публикаций. E-mail: bdv-76@yandex.ru

Dubyago Marina Nikolaevna, an assistant professor, Southern Federal University. The field of her research covers the development of mathematical modeling algorithms, study and provision of power supply system reliability as well as reliability of automated units based on them. It implies search for new methods and updating of the existing methods and means of continuous monitoring and diagnostics of faults in power cables as well as theoretical fundamentals of trend studies and forecast of power supply system development. E-mail: w_m88@mail.ru

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich, an associate professor, Southern Federal University. His research interests are focused on electrical engineering, development of equivalent conversion methods of linear and non-linear equivalent electric circuits and development of algorithms of circuit synthesis automation methods. He is also involved in developing forecast procedures of power equipment isolation in terms of electric net mode parameters. His research is also related to research into nanocomposite gas sensitive materials by the impedance spectroscopy method as well as to mathematical methods of power system modes and stability. He is the author of 10 author's certificates and RF patents and of over 100 publications. E-mail: nik1-58@mail.ru

Bur'kov Dmitry Vladimirovich, an associate professor, Southern Federal University. His research interests are focused on computer technologies of distance learning in engineering field, didactics and methodology of the training process, modeling of power supply systems, electric drives and other power engineering objects. He is the author of over 40 publications

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-127-140

Accounting for the partial discharge energy in the mathematical model of power cable thermal fluctuation processes^{*}

M.N. DUBYAGO^a, N.K. POLUYANOVICH^b, D.V. BURKOV^c

Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347922, Russian Federation

^a w_m88@mail.ru ^b nik1-58@mail.ru ^c bdv-76@yandex.ru

Abstract

It is shown that the presence of impurities or oxidation products resulting from insulation heating leads to leakage currents. The formula for calculating the power released by the active component of the leakage current is obtained. A mathematical model is obtained to calculate the power of the CR, as well as to determine the location of ml insertion in the base insulation, due to the power of the active composition of the leakage current, when it occurs in the base cable insulation.

The calculation of the change in the heat flux passing through the cable insulation layers is carried out depending on the radial distances by the method of piecewise given functions, taking into account thermal resistance of the insertion. The proposed mathematical model (7) allows determining the presence of insertions in the insulating material along with the layer-by-layer calculation of isotherms in the cross-section of the cable. The proposed mathematical model takes into account the heat losses caused by the CR in the cable insulation and their effect on the temperature distribution profile at the characteristic points of the cross section of the SCL. The technique proposed in the developed model allows for the accounting of heat losses based on the thermal and geometric dimensions of the inclusion, which was not taken into account in the above models. This will make it possible to obtain the temperature for all SCL layers, starting from the radial distances, the insertion parameters caused by the current of the insulation core, as the main rate-forming factor.

The software "System" of measurement and calculation of thermal characteristics of SCL (SMaCTC) [1] based on the mathematical model of the temperature field in the cable section is developed. The software differs from the existing possibility of layer-by-layer control of thermal fluctuation processes by the temperature value on the cable surface.

Keywords: partial discharge energy, thermal fluctuation processes, insulation materials, power cables, leakage current, heat loss, wear, prediction, non-destructive testing method

REFERENCES

1. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. *"Sistema" izmereniya i rascheta termofluktuationnykh kharakteristik silovykh kabel'nykh linii (SMaCTC)* ["System" of measurement and calculation of thermal characteristics of power cable lines]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2018612492, 2018. (In Russian, unpublished).
2. Merkulov V.I. *Matematicheskoe modelirovanie v elektroizolyatsionnykh konstruktsiyakh* [Mathematical modeling in electrical insulating structures]. Tomsk, TPU Publ., 2001. 156 p.
3. Kuchinskii G.S., Kizevetter V.E., Pinal' Yu.S. *Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya* [Insulation of high voltage installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 367 p.
4. Korzhov A.V., Tomasheva E.V. Energeticheskaya diagramma silovogo kabelya dlya analiza aktivnykh poter', vliyayushchikh na sostoyanie izolyatsii [Energy diagram of a power cable for the analysis of active losses affecting the condition of the insulation]. *Vestnik YuUrGU. Seriya:*

^{*} Received 16 January 2019.

Energetika – Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering, 2008, no. 11, pp. 29–31.

5. Zaitsev E.S., Korol'kov V.V., Lebedev V.D., Mozhzhuhina V.V. [Simulation of thermal processes in a cable with cross-linked polyethylene insulation by means of Matlab and Simulink]. *Proektirovanie inzhenernykh i nauchnykh prilozhenii v srede MATLAB : trudy V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Designing engineering and scientific applications in MATLAB: proceedings of the V International scientific conference]. Khar'kov, 2011, pp. 615–622. (In Russian).

6. Shirokov O.G., Zaliznyi D.I. Teplovye skhemy zameshcheniya elektroenergeticheskikh ustroystv [Thermal equivalent circuits of electric power devices]. *Naukoemkie tekhnologii – Science Intensive Technologies*, 2008, no. 2, pp. 63–67.

7. Yavorskii B.M., Detlaf A. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov* [Physics handbook for engineers and university students]. Moscow, Nauka Publ., 1979.

8. Koshkin N.I., Shirkevich M.G. *Spravochnik po elementaroi fizike* [Handbook of elementary physics]. Moscow, Nauka Publ., 1974.

9. Leonov V.M., Peshkov I.B., Ryazanov I.B., Kholodnyi S.D. *Osnovy kabel'noi tekhniki* [Basics of cable technology]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 432 p.

10. Privezentsev V.A., Grodnev I.I., Kholodnyi S.D., Ryazanov I.B. *Osnovy kabel'noi tekhniki* [Basics of cable technology]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1967.

11. *IEC 60034-1: 2004. Rotating electrical machines. Pt. 1. Rating and performance*. 137 p.

12. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Termofluktatsionnyi metod diagnostiki sostoyaniya izolyatsionnykh materialov SKL i prognozirovanie ikh ostatochnogo resursa [Thermofluctuation method of diagnosing the condition of the insulation materials of the SCR and the prediction of their residual life]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 66–71.

13. Dubyago M.N., Pshikhopov V.Kh., Poluyanovich N.K. Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Evaluation and prediction of insulation materials of power cable lines]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2015, no. 7, pp. 230–237.

14. Gorelova V.L., Mel'nikova E.N. *Osnovy prognozirovaniya sistem* [Fundamentals of systems forecasting]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 267 p.

15. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Termodinamicheskii sposob vyyavleniya destruktssii izolyatsii v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya resursa kabel'nykh sistem [Thermodynamic method of detection of insulation destruction in the problems of diagnostics and forecasting of cable systems resource]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2017, no. 3 (46), p. 25.

16. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Pshikhopov V.Kh. Metod issledovaniya termofluktatsionnykh protsessov v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya izolyatsionnykh materialov [Method of research of thermofluctuation processes in problems of diagnostics and forecasting of insulating materials]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Don State Technical University*, 2017, vol. 17, no. 3 (90), pp. 117–127.

17. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and power supply systems. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 2018, vol. 5 (16), pp. 1–4.

18. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. *International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering 2015 (AEECE 2015)*. Amsterdam, Atlantis Press, 2015, pp. 49–54.

19. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 229, p. 012036.

20. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Estimation of insulating materials depreciation and forecasting the residual cable resource considering the current core temperature. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 415–420.

Для цитирования:

Дубяго М.Н., Полюянович Н.К., Бурков Д.В. Учет энергии частичных разрядов в математической модели термофлуктуационных процессов силового кабеля // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 127–140. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-127-140.

For citation:

Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Burkov D.V. Uchet energii chastichnykh razryadov v matematicheskoi modeli termoflukuatsionnykh protsessov silovogo kabelya [Accounting for the energy of partial discharges in the mathematical model of thermal fluctuation processes of the power cable]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 127–140. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-127-140.

УДК 621.311

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-141-153

Угловая характеристика синхронного генератора, работающего через длинную линию, в паузу ОАПВ*

Т.Г. КРАСИЛЬНИКОВА^{1,a}, Г.И. САМОРОДОВ^{2,b}

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

² 630126, РФ, г. Новосибирск, ул. Кленовая, 10/1, Сибирский научно-исследовательский институт энергетики (СибНИИЭ)

^a tatka552005@ya.ru ^b german-samorodov@ya.ru

В настоящей статье обсуждается проблема расчета угловой характеристики синхронного генератора, связанная с ликвидацией дуговых однофазных коротких замыканий в линиях сверхвысокого напряжения (СВН). В связи с большой длиной линий СВН такие аварии составляют подавляющую долю (98 %). При этом значительная часть (70 %) однофазных коротких замыканий (ОКЗ) представляет неустойчивые дуговые аварии, которые могут быть успешно ликвидированы в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Бестоковая пауза при ОАПВ зависит от величины токов дуги подпитки и находится в пределах 0,5...3,0 с. Поэтому представляет интерес анализ характера динамических переходов при использовании ОАПВ различной продолжительности и оценка уровня пропускной способности дальних электропередачах СВН по условию динамической устойчивости. Особенности динамического перехода при определении аварии можно проследить с помощью угловых характеристик нормального режима, режима ОКЗ и ОАПВ. Однако в литературе отсутствует точный способ моделирования угловой характеристики в паузу ОАПВ, когда аварийная фаза отключена с двух сторон по концам линии. В статье предложен оригинальный точный алгоритм для расчета угловой характеристики синхронного генератора, работающего через ВЛ СВН в паузу ОАПВ, с целью оценки погрешности упрощенного моделирования угловой характеристики, когда двустороннее отключение фазы заменяется одним разрывом либо в начале, либо в конце линии. Результаты проведенных сравнительных расчетов применительно к ВЛ 500 кВ показывают, что упрощенный способ моделирования паузы ОАПВ может давать погрешность при определении максимума угловой характеристики. Поэтому в общем случае следует строго придерживаться способа моделирования паузы ОАПВ при определении угловой характеристики синхронного генератора, работающего на длинную линию.

Ключевые слова: дуговое однофазное короткое замыкание, однофазное автоматическое повторное включение, динамическая устойчивость, угловая характеристика, синхронный генератор, линия сверхвысокого напряжения, разрыв фазы, метод симметричных составляющих, погрешность расчетов

* Статья получена 20 декабря 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

При анализе динамической устойчивости при ликвидации дуговых однофазных коротких замыканий с использованием ОАПВ [1, 2] возникает задача моделирования угловой характеристики синхронного генератора, работающего через ВЛ сверхвысокого напряжения в паузу ОАПВ. Наличие двух разрывов по концам линии затрудняет решение этой задачи. Поэтому обычно используется упрощенный подход [3–15], при котором двойной разрыв заменяется одиночным разрывом на одном из концов линии, т. е. в начале или в конце линии. Однако в этом случае возникает потребность оценки погрешности, которая будет иметь место при использовании упрощенного подхода. В настоящей статье впервые приводится точное решение задачи при двустороннем разрыве аварийной фазы линии, что позволяет дать оценку погрешности при использовании упрощенного подхода с одиночным разрывом в начале или конце линии.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основываясь на методе симметричных составляющих, применительно к схеме электропередачи в режиме паузы ОАПВ (рис. 1) впервые обосновывается алгоритм для расчета угловой характеристики синхронного генератора, работающего через длинную линию, в паузу ОАПВ.

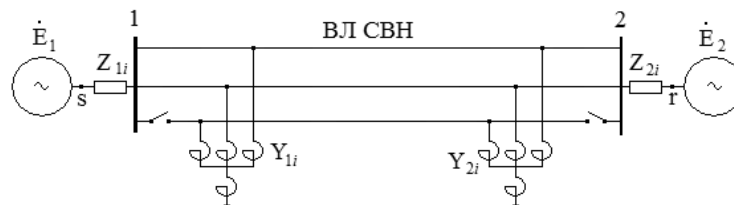


Рис. 1. Схема электропередачи в режиме паузы ОАПВ

Fig. 1. Transmission system scheme in the SPAR dead time

В случае упрощенного решения задачи, когда два разрыва по концам линии заменяются только одним разрывом либо в начале линии, либо в ее конце, как это показано на рис. 2, приводятся для удобства известные алгоритмы для расчета угловой характеристики синхронного генератора, работающего через длинную линию.

Далее проводится оценка погрешности определения угловой характеристики при упрощенном моделировании паузы ОАПВ на примере длинной линии 500 кВ.

2. УГЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИ ДВУСТОРОННЕМ РАЗРЫВЕ ЛИНИИ В РЕЖИМЕ ПАУЗЫ ОАПВ

Вывод точного алгоритма для определения угловой характеристики при двустороннем разрыве линии в режиме паузы ОАПВ основывается на использовании метода симметричных составляющих. На рис. 3 показана схема замещения i -й последовательности в режиме паузы ОАПВ.

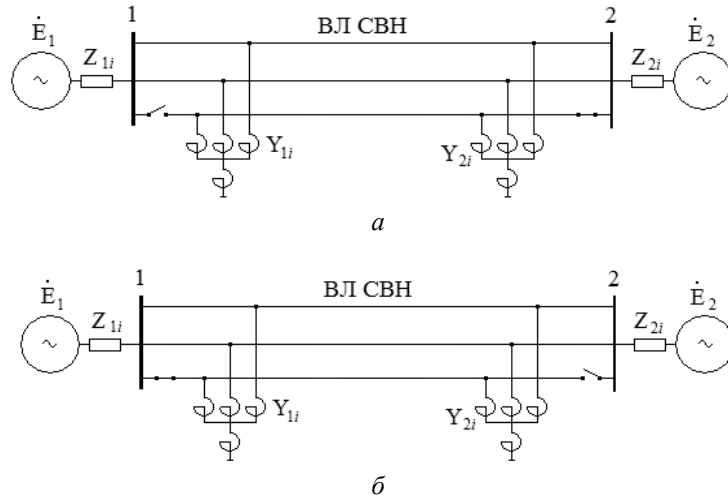


Рис. 2. Упрощенное моделирование паузы ОАПВ:

a – разрыв в начале ВЛ; *б* – разрыв в конце ВЛ

Fig. 2. Simplified simulation of the SPAR dead time:

a is an opening at the HL beginning; *b* is an opening at the HL end



Рис. 3. Схема замещения *i*-й последовательности

Fig. 3. Equivalent circuit of the *i*-th sequence network

Примыкающие системы характеризуются лишь ЭДС прямой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1i}: \quad & \dot{E}_{11} = \dot{E}, \quad \dot{E}_{12} = 0, \quad \dot{E}_{10} = 0, \\ \dot{E}_{2i}: \quad & \dot{E}_{21} = \dot{E}, \quad \dot{E}_{22} = 0, \quad \dot{E}_{20} = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $i = 1, 2, 0$ – индексы прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Схема на рис. 3 приводится к узлу 1, как показано на рис. 4.

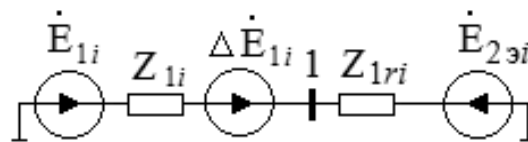


Рис. 4. Схема замещения после приведения к узлу 1

Fig. 4. Equivalent circuit after reduction to node 1

Из этой схемы вытекают следующие уравнения:

$$\dot{E}_{1i} + \Delta \dot{E}_{1i} - \dot{E}_{2\alpha i} = Z_{1\Sigma i} \dot{I}_{1i}, \quad (2)$$

где $\dot{E}_{2\alpha i} = \frac{\dot{E}_{2i} - \Delta \dot{U}_{2i}}{D_{1ri}}$, $Z_{1\Sigma i} = Z_{1i} + Z_{1ri}$, $Z_{1ri} = \frac{B_{1ri}}{D_{1ri}}$; B_{1ri}, D_{1ri} – коэффициенты четырехполюсника 1-г для i -й последовательности.

Схема на рис. 3 приводится к узлу 2, как показано на рис. 5.

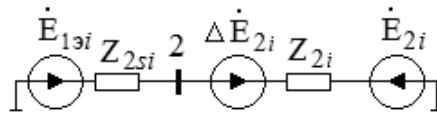


Рис. 5. Схема замещения после приведения к узлу 2

Fig. 5. Equivalent circuit after reduction to node 2

Из этой схемы вытекают следующие уравнения:

$$\dot{E}_{1\alpha i} + \Delta \dot{U}_{2i} - \dot{E}_{2i} = Z_{2\Sigma i} \dot{I}_{2i}, \quad (3)$$

где $\dot{E}_{1\alpha i} = \frac{\dot{E}_{1i} - \Delta \dot{U}_{1i}}{A_{s2i}}$, $Z_{2\Sigma i} = Z_{2i} + Z_{2si}$, $Z_{2si} = \frac{B_{s2i}}{A_{s2i}}$; B_{s2i}, D_{s2i} – коэффициенты четырехполюсника s-2 для i -й последовательности.

В итоге имеем следующие системы уравнений, приведенные к узлу 1:

$$\dot{E}_1 + \Delta \dot{U}_1 - \frac{\dot{E}_2 - \Delta \dot{U}_2}{D_{1r}} = Z_{1\Sigma} \dot{I}_1, \quad (4)$$

$$\Delta \dot{U}_{12} + \frac{\Delta \dot{U}_{22}}{D_{1r2}} = Z_{1\Sigma 2} \dot{I}_{12}, \quad (5)$$

$$\Delta \dot{U}_{10} + \frac{\Delta \dot{U}_{20}}{D_{1r0}} = Z_{1\Sigma 0} \dot{I}_{10} \quad (6)$$

и к узлу 2:

$$\frac{\dot{E}_1 - \Delta \dot{U}_1}{A_{s2}} - \dot{E}_2 + \Delta \dot{U}_2 = Z_{2\Sigma} \dot{I}_2, \quad (7)$$

$$\frac{\Delta \dot{U}_{12}}{A_{s22}} + \Delta \dot{U}_{22} = Z_{2\Sigma 2} \dot{I}_{22}, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta \dot{U}_{10}}{A_{s20}} + \Delta \dot{U}_{20} = Z_{2\Sigma 0} \dot{I}_{20}. \quad (9)$$

Граничные условия в местах разрыва:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 + \dot{I}_{12} + \dot{I}_{10} &= 0, \\ \dot{I}_2 + \dot{I}_{22} + \dot{I}_{20} &= 0, \\ \Delta\dot{U}_1 &= \Delta\dot{U}_{12} = \Delta\dot{U}_{10}, \\ \Delta\dot{U}_2 &= \Delta\dot{U}_{22} = \Delta\dot{U}_{20}. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения (4) и (7) преобразуются к следующему виду:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1\text{норм}} + \frac{\Delta\dot{U}_1}{Z_{1\Sigma}} + \frac{\Delta\dot{U}_2}{Z_{1\Sigma}D_{1r}}, \quad (11)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{2\text{норм}} - \frac{\Delta\dot{U}_1}{Z_{2\Sigma}A_{s2}} + \frac{\Delta\dot{U}_2}{Z_{1\Sigma}}, \quad (12)$$

где $\dot{I}_{1\text{норм}} = \frac{1}{Z_{1\Sigma}} \left(\dot{E}_1 - \frac{\dot{E}_2}{D_{1r}} \right)$, $\dot{I}_{2\text{норм}} = \frac{1}{Z_{2\Sigma}} \left(\frac{\dot{E}_1}{A_{s2}} - \dot{E}_2 \right)$ – токи нормального режима соответственно в пунктах 1 и 2.

Уравнения (5), (6) и (8), (9) с учетом граничных условий (10) приводятся к следующему виду:

$$\begin{aligned} Y_{1\varepsilon}\Delta\dot{U}_1 + Y_{1r\varepsilon}\Delta\dot{U}_2 &= -\dot{I}_1, \\ Y_{s2\varepsilon}\Delta\dot{U}_1 + Y_{2\varepsilon}\Delta\dot{U}_2 &= -\dot{I}_2, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} Y_{1\varepsilon} &= \frac{1}{Z_{1\Sigma2}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma0}}, & Y_{1r\varepsilon} &= \frac{1}{Z_{1\Sigma2}D_{1r2}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma0}D_{1r0}}, \\ Y_{s2\varepsilon} &= \frac{1}{Z_{2\Sigma2}A_{s22}} + \frac{1}{Z_{2\Sigma0}D_{s20}}, & Y_{2\varepsilon} &= \frac{1}{Z_{2\Sigma2}} + \frac{1}{Z_{2\Sigma0}}. \end{aligned}$$

Разрешив систему уравнений (13) относительно $\Delta\dot{U}_1$ и $\Delta\dot{U}_2$, найдем

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}_1 &= -\Delta Z_{11}\dot{I}_1 - \Delta Z_{12}\dot{I}_2, \\ \Delta\dot{U}_2 &= -\Delta Z_{21}\dot{I}_1 - \Delta Z_{22}\dot{I}_2. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{где } MY = \begin{bmatrix} Y_{1\varepsilon} & Y_{1r\varepsilon} \\ Y_{s2\varepsilon} & Y_{2\varepsilon} \end{bmatrix}, \quad MY^{-1} = \begin{bmatrix} \Delta Z_{11} & \Delta Z_{12} \\ \Delta Z_{21} & \Delta Z_{22} \end{bmatrix}.$$

После подстановки (14) в (11) и (12) получим

$$\begin{aligned} K_{11}\dot{I}_1 + K_{12}\dot{I}_2 &= \dot{I}_{1\text{норм}}, \\ K_{21}\dot{I}_1 + K_{22}\dot{I}_2 &= \dot{I}_{2\text{норм}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} K_{11} &= 1 + \frac{\Delta Z_{11}}{Z_{1\Sigma}} + \frac{\Delta Z_{21}}{Z_{1\Sigma} D_{1r}}, & K_{12} &= \frac{\Delta Z_{12}}{Z_{1\Sigma}} + \frac{\Delta Z_{22}}{Z_{1\Sigma} D_{1r}}, \\ K_{21} &= \frac{\Delta Z_{11}}{Z_{2\Sigma} A_{s2}} + \frac{\Delta Z_{21}}{Z_{2\Sigma}}, & K_{22} &= 1 + \frac{\Delta Z_{12}}{Z_{2\Sigma} A_{s2}} + \frac{\Delta Z_{22}}{Z_{2\Sigma}}. \end{aligned}$$

Разрешив систему (15) относительно \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , найдем

$$\dot{I}_1 = \Delta K_{11} \dot{I}_{1\text{норм}} + \Delta K_{12} \dot{I}_{2\text{норм}}, \quad (16)$$

$$\dot{I}_2 = \Delta K_{21} \dot{I}_{1\text{норм}} + \Delta K_{22} \dot{I}_{2\text{норм}}, \quad (17)$$

где $MK = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}$, $MK^{-1} = \begin{bmatrix} \Delta K_{11} & \Delta K_{12} \\ \Delta K_{21} & \Delta K_{22} \end{bmatrix}$.

Соответственно уравнение угловой характеристики со стороны узла 1 с учетом (16) в режиме паузы ОАПВ запишется как

$$P_{1\text{ОАПВ}} = \text{Re} \sqrt{3} \dot{E}_1 \bar{I}_1 = \text{Re} \sqrt{3} \dot{E}_1 (\Delta \bar{K}_{11} \bar{I}_{1\text{норм}} + \Delta \bar{K}_{12} \bar{I}_{2\text{норм}}). \quad (18)$$

3. УГЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ РАЗРЫВЕ ЛИНИИ, УПРОЩЕННО МОДЕЛИРУЮЩЕМ РЕЖИМ ПАУЗЫ ОАПВ

Получим необходимые соотношения для случая одностороннего разрыва в начале линии (рис. 2, а). ЭДС примыкающих систем определяются по (1). Схема на рис. 3 приводится к узлу 1, как показано на рис. 6.

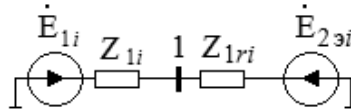


Рис. 6. Схема после приведения к узлу 1

Fig. 6. Circuit after reduction to node 1

Из этой схемы вытекают следующие уравнения:

$$\dot{E}_{1i} + \Delta \dot{E}_{1i} - \dot{E}_{2zi} = Z_{1\Sigma i} \dot{I}_{1i}, \quad (19)$$

где $\dot{E}_{2zi} = \frac{\dot{E}_{2i}}{D_{1ri}}$, $Z_{1\Sigma i} = Z_{1i} + Z_{1ri}$, $Z_{1ri} = \frac{B_{1ri}}{D_{1ri}}$; B_{1ri} , D_{1ri} – коэффициенты четырехполюсника 1-г для i -й последовательности.

В итоге имеем следующие уравнения, приведенные к узлу 1:

$$\dot{I}_{1\text{норм}} + \frac{\Delta\dot{E}_1}{Z_{1\Sigma}} = \dot{I}_1, \quad (20)$$

$$\frac{\Delta\dot{E}_{12}}{Z_{1\Sigma 2}} = \dot{I}_{12}, \quad (21)$$

$$\frac{\Delta\dot{E}_{10}}{Z_{1\Sigma 0}} = \dot{I}_{10}, \quad (22)$$

где $\dot{I}_{1\text{норм}} = \frac{1}{Z_{1\Sigma}} \left(\dot{E}_1 - \frac{\dot{E}_2}{D_{1r}} \right)$ – ток нормального режима в пункте 1.

Граничные условия в месте разрыва имеют вид

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_{12} + \dot{I}_{10} = 0, \quad \Delta\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_{12} = \Delta\dot{U}_{10}. \quad (23)$$

Сложив уравнения (20)–(22) и учитывая граничные условия (23), найдем

$$\dot{I}_{1\text{норм}} + \left(\frac{1}{Z_{1\Sigma}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma 2}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma 0}} \right) \Delta\dot{E}_1 = 0. \quad (24)$$

Вычтя (20) из (24), получим

$$\left(\frac{1}{Z_{1\Sigma 2}} + \frac{1}{Z_{1\Sigma 0}} \right) \Delta\dot{E}_1 = -\dot{I}_1. \quad (25)$$

Из (25) при $\Delta\dot{U}_1 = -\Delta\dot{E}_1$ следует

$$\Delta Z_1 = \frac{\Delta\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{Z_{1\Sigma 2} + Z_{1\Sigma 0}}{Z_{1\Sigma 2} Z_{1\Sigma 0}}. \quad (26)$$

Таким образом, разрыв в схеме прямой последовательности, на основе которой определяется угловая характеристика, заменяется дополнительным сопротивлением (26).

Аналогичные соотношения получаются для случая разрыва в конце линии:

$$\Delta Z_2 = \frac{\Delta\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \frac{Z_{2\Sigma 2} + Z_{2\Sigma 0}}{Z_{2\Sigma 2} Z_{2\Sigma 0}}, \quad (27)$$

где $Z_{2\Sigma i} = Z_{2i} + Z_{2si}$, $Z_{2si} = \frac{B_{s2i}}{A_{s2i}}$; $i = 2, 0$, B_{s2i} , A_{s2i} – коэффициенты четырехполюсника s-2 для i -й последовательности.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

В табл. 1–4 приведены результаты сравнительных расчетов, показывающие погрешность упрощенного моделирования угловой характеристики в паузу ОАПВ с помощью одностороннего разрыва либо в начале линии, либо в ее конце. Расчеты проведены применительно к ВЛ 500 кВ [16]. Как следует из таблиц, упрощенный способ моделирования паузы ОАПВ может давать погрешность при определении максимума угловой характеристики, превышающую 5 %.

Таблица 1

Table 1

Оценка погрешности способа моделирования паузы ОАПВ
($\ell = 350$ км, $Z_1 = Z_{12} = 90$ i, $Z_{10} = 30$ i, $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$, степень компенсации 0 %)

Error estimate of the simulation way of the SPAR dead time
($\ell = 350$ км, $Z_1 = Z_{12} = 90$ i, $Z_{10} = 30$ i, $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$, compensation degree 0 %)

Принятый способ моделирования паузы ОАПВ	Максимум угловой характеристики, МВт	Погрешность моделирования, %
Разрывы по концам ВЛ	963,5	–
Разрыв в начале ВЛ	959	–0,5
Разрыв в конце ВЛ	985	2,2

Таблица 2

Table 2

Оценка погрешности способа моделирования паузы ОАПВ
($\ell = 350$ км, $Z_1 = Z_{12} = 90$ i, $Z_{10} = 30$ i, $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$, степень компенсации 97 %)

Error estimate of the simulation way of the SPAR dead time
($\ell = 350$ км, $Z_1 = Z_{12} = 90$ i, $Z_{10} = 30$ i, $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$, compensation degree 97 %)

Принятый способ моделирования паузы ОАПВ	Максимум угловой характеристики, МВт	Погрешность моделирования, %
Разрывы по концам ВЛ	1050	–
Разрыв в начале ВЛ	991	–5,6
Разрыв в конце ВЛ	992	–5,5

Таблица 3

Table 3

Оценка погрешности способа моделирования паузы ОАПВ
($\ell = 700$ км, $Z_1 = Z_{12} = 90$ i, $Z_{10} = 30$ i, $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$, степень компенсации 48 %)

Error estimate of the simulation way of the SPAR dead time
($\ell = 700$ км, $Z_1 = Z_{12} = 90$ i, $Z_{10} = 30$ i, $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$, compensation degree 48 %)

Принятый способ моделирования паузы ОАПВ	Максимум угловой характеристики, МВт	Погрешность моделирования, %
Разрывы по концам ВЛ	707,5	–
Разрыв в начале ВЛ	757,5	7,1
Разрыв в конце ВЛ	733	3,6

Таблица 4

Table 4

Оценка погрешности способа моделирования паузы ОАПВ
($\ell = 700$ км, $Z_1 = Z_{12} = 90$ i, $Z_{10} = 30$ i, $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$, степень компенсации 97 %)

Error estimate of the simulation way of the SPAR dead time
($\ell = 700$ км, $Z_1 = Z_{12} = 90$ i, $Z_{10} = 30$ i, $Z_2 = Z_{22} = Z_{20} = 0$, compensation degree 97 %)

Принятый способ моделирования паузы ОАПВ	Максимум угловой характеристики, МВт	Погрешность моделирования, %
Разрывы по концам ВЛ	722,5	–
Разрыв в начале ВЛ	719,5	–0,4
Разрыв в конце ВЛ	724,5	0,3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен оригинальный точный алгоритм для расчета угловой характеристики синхронного генератора, работающего через ВЛ сверхвысокого напряжения, в паузу ОАПВ. Сравнение упрощенных способов моделирования паузы ОАПВ, когда двусторонний разрыв заменяется одним разрывом либо в начале, либо в конце линии, показало, что погрешность расчета угловых характеристик может превышать 5 %. Поэтому в общем случае следует придерживаться предложенного строгого способа моделирования паузы ОАПВ при определении угловой характеристики синхронного генератора, работающего на длинную линию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / под ред. М.Л. Левинштейна. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
2. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России: теоретические и практические основы. Т. 1. Электропередачи переменного тока / под общ. ред. А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорация «ЕЭЭК», 2012. – 696 с.
3. Веников В.А. Дальние электропередачи: специальные вопросы. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 312 с.
4. 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.
5. Шполянский О.Г. Параметры сближенных линий 750 кв. и характеристики их входного сопротивления в паузе однофазного автоматического повторного включения // Труды Института электродинамики НАН Украины. – 2015. – № 40. – С. 39–43.
6. Раишес В.С. Обобщение эксплуатационных данных эффективности ОАПВ ВЛ СВН и опытных данных времени гашения дуги подпитки // Электрические станции. – 1989. – № 3. – С. 65–72.
7. Альмендеева Е.В. Особенности выбора параметров срабатывания ОАПВ на примере МП терминала производства «ЭКРА» // Электроэнергетика глазами молодежи: труды 6 Международной молодежной научно-технической конференции, Иваново, 9–13 ноября 2015 г.: в 2 т. – Иваново, 2015. – Т. 1. – С. 39–42.

8. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1993. – 560 с.
9. Барз И.Г., Эдельман В.И. Воздушные линии электропередачи: вопросы эксплуатации и надежности. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
10. Перспективы применения ОАПВ в электропередаче 1150 кВ / Н.Н. Беляков, В.С. Рашкес, М.Л. Левинштейн, М.И. Хорошев // Электропередачи 1150 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – Кн. 1. – С. 129–158.
11. Режимы дальних электропередач в примерах / Г.К. Зарудский, Е.В. Путятин, И.С. Рокотян и др.; под ред. Ю.П. Рыжова. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 88 с.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Справочник по проектированию электроэнергетических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 290 с.

Красильникова Татьяна Германовна, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – транспорт электроэнергии на дальние расстояния, нетрадиционные способы передачи электроэнергии. Имеет более 50 публикаций. E-mail: tatka552005@ya.ru

Самородов Герман Иванович, доктор технических наук, профессор, научный руководитель отдела новых технологий филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» – СИБНИИЭ. Основное направление научных исследований – транспорт электроэнергии на дальние и сверхдальние расстояния, надежность электроэнергетических систем. Имеет около 100 публикаций, в том числе 3 монографии. E-mail: german-samorodov@yandex.ru

Krasil'nikova Tatiana Germanovna, D.Sc. (Eng.), professor at the department of automated power systems, NSTU. Her research interests are focused on electric power transportation over long distances and non-conventional ways of power transmission. She is the author of more than 50 publications. E-mail: tatka552005@ya.ru

Samorodov German Ivanovich, D.Sc. (Eng.), professor, research supervisor in the department of new technologies, branch of AO "NTS FSK" SIBRIPEE. The main field of his research is electric power transportation over long and very long distances and reliability of power systems. He is the author of over 100 publications including 3 monographs. E-mail: german-samorodov@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-141-153

Angular characteristic of a synchronous generator operating over a long line in the dead time of single-phase auto-reclosing*T. KRASIL'NIKOVA^{1,a}, G. SAMORODOV^{2,b}¹ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation² Siberian Research Institute of Power Engineering, 10/1, Klenovaya St., Novosibirsk, 630126, Russian Federation^a *tatka552005@ya.ru* ^b *german-samorodov@ya.ru***Abstract**

This article discusses the problem of calculating an angular characteristic of a synchronous generator related to the elimination of arcing single phase-to-ground faults in the lines of ultrahigh voltage (UHV). Due to a long length of UHV lines such accidents cause the vast majority of them (98 %). At the same time, a significant part (70 %) of single phase-to-ground faults (SPGF) represents unstable arc accidents, which can be successfully eliminated in the single-phase automatic reclosing (SPAR) cycle. The SPAR dead time depends on the value of the secondary arc currents and is in the range of 0.5...3.0 s. Therefore, it is of interest to analyze the nature of dynamic transitions when using SPAR of different duration and to assess the capacity level of very long power transmission lines in terms of dynamic stability. The features of dynamic transition in determining the accident can be traced using angular characteristics of the normal, SPGF and SPAR modes. However, in the literature there is no exact way to simulate the angular characteristic in the dead time, when the emergency phase is disconnected on both sides at the ends of the line. The article proposes an original exact algorithm for calculating an angular characteristic of a synchronous generator operating over the UHV line in the dead time, in order to estimate an error of simplified modeling of the angular characteristic, when the two-way phase opening is replaced by a single gap either at the beginning or at the end of the line.

Keywords: arcing single phase-to-ground fault, single-phase auto-reclosing, transient stability, power-angle curve, synchronous generator, UHV line, opening of a phase, symmetrical component method, calculation error

REFERENCES

1. Levinshtein M.L., ed. *Protsessy pri odnofaznom avtomaticheskoy povtornom vklyuchenii linii vysokikh napryazheniy* [The processes of high voltage lines at single-phase auto-reclosing]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 256 p.
2. D'yakov A.F., ed. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii: teoreticheskie i prakticheskie osnovy. T 1. Elektroperedachi peremennogo toka* [The electric networks of super- and ultra-high voltage UES of Russia. Theoretical and practical foundations. Vol. 1]. Moscow, NTF "Energoprogress" Corporation "EEEE" Publ., 2012. 696 p.
3. Venikov V.A. *Dal'nie elektroperedachi: spetsial'nye voprosy* [Long-distance transmission]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960. 312 p.
4. Krasil'nikova T.G., Dzhononayev S.G. *Sposoby likvidatsii odnofaznykh korotkikh замыканий v vozdukhnykh liniyakh sverkhvysokogo napryazheniya* [The methods of liquidation single-phase short circuit in the aerial lines of extra-high voltage]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo*

* Received 20 December 2018.

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – *Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (84), pp. 116–130.

5. Shpolianskii O.G. Parametry sblizhennykh linii 750 kv. i kharakteristiki ikh vkhodnogo so-protivleniya v pauze odnofaznogo avtomaticheskogo povtornogo vklyucheniya [Parameters of 750 kV coupled overhead transmission lines and characteristics of their input impedance during the pause of one phase automated repeated switching]. *Trudy Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy – Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2015, no. 40, pp. 39–43.

6. Rashkes V.S. Obobshchenie ekspluatatsionnykh dannykh effektivnosti OAPV VL SVN i opytnykh dannykh vremeni gasheniya dugi podpitki [Generalisation 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).

7. Al'mendeeva E.V. [The features choice of parameters response Single-Phase Auto-Reclosing for example of the MP terminal production "EKRA"]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy 6 mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii: v 2 t.* [The electric power industry through the impression of youth: the proceedings of the 6 international scientific-technical conference: in 2 vol.], Ivanovo, 9–13 November 2015, vol. 1, pp. 39–42. (In Russian).

8. Aleksandrov G.N., ed. *Proektirovanie linii elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [The design of superhigh voltage transmission lines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1993. 560 p.

9. Barg I.G., Edel'man V.I. *Vozdushnye linii elektroperedachi: voprosy ekspluatatsii i nadezhnosti* [The overhead transmission lines: Issues of operation and reliability]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p.

10. Belyakov N.N., Rashkes V.S., Levinshtein M.L., Khoroshev M.I. Perspektivy primeneniya OAPV v elektroperedache 1150 kV [The prospects of application of the Single-Phase Auto-Reclosing in power transmission 1150 kV]. *Elektroperedachi 1150 kV* [1150 kV transmission]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, bk. 1, pp. 129–158.

11. Ryzhov Yu.P., ed. *Rezhimy dal'nikh elektroperedach v primerakh* [The modes of longdistance transmission in the examples]. Moscow, MPEI Publ., 1994. 88 p.

12. 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.

13. Krasil'nikova T.G., Dzhononaev S.G. Sravnitel'nyi analiz putei likvidatsii neustoichivykh odnofaznykh korotkikh замыканий 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.

14. Krasil'nikova T.G., Dzhononaev S.G. Vliyanie dlitel'nosti pauzy OAPV na propusknyuyu 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.

15. Krasil'nikova T.G., Dzhononaev S.G. Vliyanie prodolzhitel'nosti pauzy OAPV na propusknyuyu 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.

16. Faibisovich D.L., ed. *Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh setei* [Guide to the design of electric power networks]. Moscow, NC ENAS Publ., 2006. 290 p.

Для цитирования:

Красильникова Т.Г., Самородов Г.И. Угловая характеристика синхронного генератора, работающего через длинную линию, в паузу ОАПВ // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 141–153. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-141-153.

For citation:

Krasil'nikova T.G., Samorodov G.I. Uglovaya kharakteristika sinkhronnogo generatora, rabotayushchego cherez dlinnuyu liniyu, v pauzu OAPV [Angular characteristic of the synchronous generator operating through a long line in the dead time of single-phase auto-reclosing]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 141–153. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-141-153.

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000 года. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Научный вестник НГТУ» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям);

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление;

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей;

05.13.17 – Теоретические основы информатики;

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;

05.14.00 – Энергетика;

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы;

05.14.12 – Техника высоких напряжений;

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты.

Разделы журнала: приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; информатика, вычислительная техника и управление; энергетика.

Рекомендуемый объем статьи 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: <http://journals.nstu.ru/vestnik>

Условия приема статей

В редакцию **Научного вестника НГТУ** представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.

4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.

5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – **Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3	верхнее поле – 4,0
правое поле – 3,3	нижнее поле – 3,9
текстовое поле 22 × 14,4	

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, межстрочный интервал с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение, Постановка задачи, Методы анализа, Основной результат, Выводы** или **Заключение**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис.* и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в подписях не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0С. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha.$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул помещать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \quad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются сверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: **Файл / Параметры страницы / Разметка; установить разные четные и нечетные и первая отличается.**

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи – с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8. Номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы – пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы пустая строка размером 10. Порядковый номер – с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка – по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий; e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках.**

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК, и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте <http://journal.nstu.ru/vestnik>.