
НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 1 (74)

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

№ 1 (74)

2019

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Бакиров Ж.Б., Бакиров М.Ж., Таженова Г.Д., Филиппова Т.С. Колебания механических систем при случайных кинематических возбуждениях	7
Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Двухэтапный устойчивый алгоритм непараметрической идентификации системы с высоким уровнем шума входного сигнала	21
Кагиров И.А., Мануева Ю.С. Разработка предикатной модели выбора лексических значений при переводе на русский жестовый язык на основе семантического словаря В.А. Тузова и системы автоматической обработки текста «Диалинг»	41
Лисицына Л.И., Навроцкий Л.Г., Блохин А.А., Белавская С.В., Камардин А.Е., Геворгян И.С., Чиркова Н.С. Специализированная установка для исследования биофизических процессов, протекающих в кожном покрове	61
Марченко А.И., Денисов В.В., Мурашкина И.С. Средства и способы управления параллельной работой электрической станции малой генерации с электрической сетью	77
Мухопад Ю.Ф., Мухопад А.Ю., Пунсык-Намжилов Д.Ц. Структурная организация управляющих автоматов с изменяемым принципом формирования команд	91
Серьшева И.А., Хрусталеv Ю.П. Адаптивные модели временных рядов в системах обработки измерительной информации	107
Яковлев Р.Н. Имитационная модель оценивания вычислительной нагрузки на центральный сервер системы видеоконференц-связи	125

*ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ*

Аюуш Ю. Анализ результатов тестирования медицинской экспертной системы на основе интеграции традиционной западной и восточной медицины	141
Гужов В.И., Поздняков Г.А., Серебрякова Е.Е. Получение разности фазовых полей при использовании метода пошагового фазового сдвига	157
Жбанова В.Л. Система цветоделения с характеристиками, близкими к XYZ МКО 1931 г.	167

ЭНЕРГЕТИКА

Губий Е.В., Зоркальцев В.И. Марковская последовательность переходящих запасов топлива.....	181
Кузьменко В.П., Соленьий С.В., Шишлаков В.Ф., Соленая О.Я. Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными осветительными устройствами.....	197
Рахимов Дж.Б., Султонов Ш.М., Ахьёев Дж.С., Худжасаидов Дж.Х. Влияние дополнительных емкостей на переходные восстанавливающиеся напряжения в режиме удаленных коротких замыканий	213
Правила для авторов	224

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 18.03.2019. Выход в свет 20.03.2019.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 19,95. Печатных листов 14,25. Издательский № 65. Заказ № 823.
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

№ 1 (74)

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

№ 1 (74)

2019

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Bakirov Zh.B., Bakirov M.Zh., Tazhenova G.D., Filippova T.S. Vibration of mechanical systems under random kinematic actions	7
Voskoboinikov Yu. E., Krysov D.A. A two-step robust algorithm of nonparametric identification for a system with a high-noise input signal	21
Kagirov I.A., Manueva Yu.S. Development of a predicate model for choosing lexical meanings when translating into the Russian sign language based on V.A. Tuzov's semantic dictionary and the Dialing text processing system	41
Lisitsina L.I., Navrotsky L.G., Blokhin A.A., Kamardin A.E., Belavskaya S.V., Gevorgyan I.S., Chirkova N.S. A Specialized Installation for Studying Biophysical Processes Occurring in the Skin	61
Marchenko A.I., Denisov V.V., Murashkina I.S. Control modes of synchronized operation of a low capacity power plant with an electric network	77
Mukhopad Yu.F., Mukhopad A.Yu., Punsik-Namzhilov D.Ts. Structural organization of control automata with a variable principle of instruction formation	91
Serysheva I.A., Khrustalev Yu.P. Adaptive time series models in the measurement data processing systems	107
Yakovlev R.N. A simulation model for estimating the computational load on the central server of a videoconferencing system	125

*INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-
MEASUREMENT SYSTEMS*

Ayush Yu. Analysis of medical expert system testing results based on the integration of traditional western and eastern medicine	141
Guzhov V.I., Pozdnyakov G.A., Serebryakova E.E. Obtaining phase difference by using the step-by-step phase shift method	157
Zhbanova V.L. A color separation system with characteristics close to CIEXYZ 1931	167

POWER ENGINEERING

Gubiy E.V., Zorkaltsev V.I. Markov sequence of carryover fuel resources	181
Kuzmenko V.P., Solyonyj V.P., Shishlakov V.F., Solyonaja O.Ya. Measurement of power quality in the power supply system with LED lightning devices	197
Rahimov J.B., Sulonov Sh.M., Ahyoev J.S., Khudzhasaidov Dzh.Kh. Effect of additional capacities on transients recovery voltage in the short – line fault mode	213
Rules for authors	224

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.2.viniti.ru>)
License ID 04303 from 20.03.2001. Signed in print March 18, 2019.
Date of publication March 20, 2019. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 19,95. Printed pages 14,25.
Publishing number 65. Order number 823.

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 539.3: 534.1

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-7-20

Колебания механических систем при случайных кинематических возбуждениях^{*}

Ж.Б. БАКИРОВ^a, М.Ж. БАКИРОВ^b, Г.Д. ТАЖЕНОВА^c, Т.С. ФИЛИПОВА^d

100027, РК, г. Караганда, бульвар Мира, 56, Карагандинский государственный
технический университет

^a bakirov_50@mail.ru ^b Madybacirov@rambler.ru ^c gulzada_2604@mail.ru

^d confucius_kstu@mail.ru

Работа посвящена исследованию линейных колебаний механической системы с одной степенью свободы при случайных кинематических возбуждениях. Для общего случая нестационарного воздействия задача решается методом функции Грина. Применением теории случайных функции получены общие выражения для определения математического ожидания и корреляционной функции выходного процесса. Рассмотрены нестационарные колебания системы при стационарных возбуждениях двух типов: в виде «белого шума» и экспоненциально-коррелированного процесса. Для этих воздействий определены выражения для корреляционной функции и дисперсии выходного процесса. Также определено выражение для дисперсии относительного перемещения массы. Такой режим колебаний характерен для переходных процессов в системе. Путем увеличения времени наблюдения осуществлен переход к установившемуся режиму колебаний системы.

Спектральным методом решена задача о стационарных колебаниях системы при стационарных случайных кинематических воздействиях. Полученное решение использовано для определения вероятностных характеристик колебаний подвески автомобиля от воздействия случайного микропрофиля дороги. При этом кинематическое воздействие представлено случайными процессами двух видов: экспоненциально-коррелированным процессом и косинусоидальным процессом. На основе решения задачи могут быть получены общие соотношения для определения спектральной плотности и корреляционной функции динамической составляющей силы в подвеске.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при расчете и проектировании систем виброзащиты оборудования и рабочих мест от случайных кинематических воздействий, а также для оценки погрешности показаний приборов и аппаратуры, установленных на основаниях, испытывающих случайные вибрации.

Ключевые слова: случайные колебания, динамическая модель, кинематическое воздействие, функция Грина, корреляционная функция, спектральная плотность, дисперсия, спектральный метод, виброзащита

^{*} Статья получена 10 сентября 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Кинематическое воздействие на механическую систему возникает при всяком движении основания, на котором она установлена. Это многочисленные устройства амортизации и демпфирования транспортных средств, системы виброзащиты различного оборудования и операторов горно-транспортных машин, средства виброзащиты приборов и аппаратуры на летательных аппаратах и морских судах, а также сейсмические воздействия на сооружения. Эти кинематические воздействия в большинстве случаев являются случайными или имеют в составе случайные флуктуации. В связи с этим анализ колебаний механических систем при случайных кинематических возбуждениях представляет большой интерес для инженерных приложений. Решение этих задач является необходимым этапом при расчете и проектировании элементов машин и приборов, при прогнозировании их надежности и долговечности. Кроме того, из-за колебаний основания искажаются показания приборов, установленных на них, и нарушается работа аппаратуры.

Вопросы анализа колебаний механических систем при кинематических воздействиях изучаются давно применительно к системам виброзащиты [1, 2]. Исследования в этом направлении продолжаются и в настоящее время [3–6]. В монографии [7] параметры кинематического воздействия рассматриваются как случайные величины.

Методы расчета механических систем на случайные воздействия изложены в монографиях [8–11]. Из них следует, что для анализа нестационарных колебаний линейных систем наиболее подходят метод функции Грина и метод дифференциальных уравнений, а для стационарных процессов наиболее эффективен метод спектральных представлений.

Вопросы применения стохастических методов к задачам виброзащиты рассмотрены в работах [12–14]. Анализ колебаний в системах виброзащиты при детерминированных и случайных воздействиях посвящены работы [15–18].

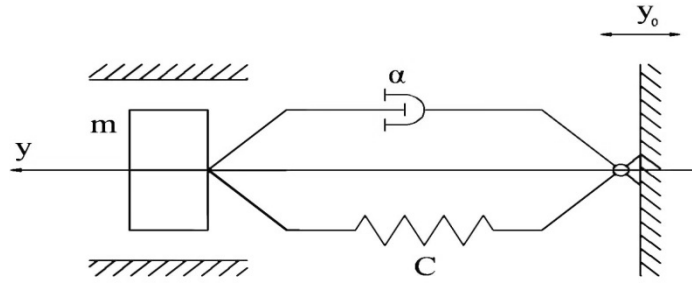
Анализ журнальных статей показывает, что исследованию колебаний механических систем при различных типах случайных кинематических возбуждений уделено недостаточно внимания. Данная работа посвящена восполнению этого пробела.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим динамическую модель механической системы с одной степенью свободы, показанную на рисунке, где масса m через упруго-диссипативный элемент с характеристиками c , α соединяется с жестким основанием. В некоторый момент времени $t_0 = 0$ основание получает смещение $y_0(t)$. Тогда уравнение движения массы имеет вид

$$\ddot{y} + 2\varepsilon\dot{y} + \omega_0^2 y = 2\varepsilon\dot{y}_0 + \omega_0^2 y_0, \quad (1)$$

где $\omega_0^2 = c/m$ – частота собственных колебаний; $2\varepsilon = \alpha/m$ – коэффициент затухания.



Динамическая модель системы

Dynamic system model

Решение этого уравнения при нулевых начальных условиях имеет вид

$$y = \frac{1}{p_0} \int_0^t k(t - \tau) (2\varepsilon \dot{y}_0 + \omega_0^2 y_0) d\tau, \quad (2)$$

где $p = \sqrt{\omega_0^2 - \varepsilon^2}$, $k(t - \tau) = e^{-\varepsilon(t-\tau)} \sin p(t - \tau)$.

Смещение y_0 считаем в общем случае случайной нестационарной функцией с известными вероятностными характеристиками. Вероятностные характеристики случайной функции представляют собой неслучайные функции: математическое ожидание $m_y(t)$, дисперсия $D_y(t)$, корреляционная функция $K_y(t, t')$ и спектральная плотность $S_y(\omega)$.

Вероятностные характеристики решения (2) равны:

$$m_y = \frac{1}{p_0} \int_0^t (\omega_0^2 m_{y_0} + 2\varepsilon m_{\dot{y}_0}) k(t - \tau) d\tau;$$

$$K_y = \frac{1}{p^2} \int_0^t \int_0^{t_1} [\omega_0^4 K_{y_0} + 2\varepsilon \omega_0^2 (K_{\dot{y}_0 y_0} + K_{y_0 \dot{y}_0}) + 4\varepsilon^2 K_{\dot{y}_0 \dot{y}_0}] \times$$

$$\times k(t - \tau) k(t_1 - \tau_1) d\tau d\tau_1, \quad (3)$$

где $m_{\dot{y}_0} = dm_{y_0} / dt$, а корреляционные функции смещения и его производной определяются по формуле [8]:

$$K_{x^p x^q} = \frac{\partial^{p+q} K(t, t')}{\partial t^p (\partial t')^q},$$

где p, q – порядки производных.

Рассмотрим действие стационарного кинематического возбуждения. При этом возможны как нестандартные колебания, если время процесса меньше времени t_s , необходимого для практического затухания переходных процессов, так и стационарные, если время процесса больше времени t_s . Определим вероятностные характеристики колебания массы при различных типах случайного воздействия.

2. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМЫ

Пусть движение основания представляет собой стационарный процесс в виде «белого шума»:

$$m_{y_0} = 0, \quad K_{y_0(\tau)} = S_0 \delta(\tau),$$

где S_0 – интенсивность процесса; $\delta(\tau)$ – дельта-функция Дирака.

Корреляционную функцию решения определяем по формуле (3):

$$\begin{aligned} K_y &= \frac{S_0}{p^2} \left\{ \omega_0^4 \int_0^t k(t-\tau)k(t_1-\tau)d\tau + 2\varepsilon\omega_0^2 \left[\int_0^t \int_0^{t_1} \frac{\partial \delta(\tau-\tau_1)}{\partial \tau} k(t-\tau)k(t_1-\tau_1)d\tau d\tau_1 + \right. \right. \\ &+ \left. \int_0^{t_1} \frac{\partial \delta(\tau-\tau_1)}{\partial \tau_1} k(t-\tau)k(t_1-\tau_1) \right] + 4\varepsilon^2 \int_0^t \int_0^{t_1} \frac{\partial^2 \delta(\tau-\tau_1)}{\partial \tau \partial \tau_1} k(t-\tau)k(t_1-\tau_1)d\tau d\tau_1 \left. \right\} = \\ &= \frac{S_0}{p^2} \left[\omega_0^4 I_1 + 2\varepsilon\omega_0^2 (I_2 + I_3) + 4\varepsilon^2 I_4 \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Вычислим интегралы I_i :

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{p^2}{4\varepsilon\omega_0^2} \left\{ e^{-\varepsilon\Delta t} \left(\cos p\Delta t + \frac{\varepsilon}{p} \sin p\Delta t \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{p^2} e^{-\varepsilon(t_1+t)} \left[\varepsilon^2 \cos p(t_1+t) - p\varepsilon \sin p(t_1+t) - \omega_0^2 \cos p\Delta t \right] \right\}, \end{aligned}$$

где $\Delta t = t_1 - t$.

Для вычисления остальных интегралов воспользуемся следующим свойством дельта-функции [9]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \dot{\delta}(t-t_0)\varphi(t)dt = -\dot{\varphi}(t_0).$$

Тогда

$$\begin{aligned} I_3 &= \int_0^t k(t-\tau)d\tau \left[-\frac{\partial k(t_1-\tau_1)}{\partial \tau_1} \right]_{\tau_1=\tau} = \\ &= \int_0^t k(t-\tau)e^{-\varepsilon(t_1-\tau)} [p \cos p(t_1-\tau) - \varepsilon \sin p(t_1-\tau)]d\tau = \\ &= \frac{p}{4\varepsilon} \left\{ e^{-\varepsilon(t-t_1)} \left[\sin p\Delta t + \frac{\varepsilon}{p} \cos p\Delta t - \frac{\varepsilon}{p} \cos p(t_1+t) \right] - e^{-\varepsilon|\Delta t|} \sin p\Delta t \right\}. \end{aligned}$$

Для вычисления I_2 достаточно здесь поменять местами t и t_1 . Тогда

$$I_2 + I_3 = 0,5 e^{-\varepsilon(t+t_1)} [\cos p\Delta t - \cos p(t_1 + t)].$$

Интеграл

$$\begin{aligned} I_4 &= \int_0^t k(t-\tau) \left[\frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^{t_1} \frac{\partial \delta(\tau-\tau_1)}{\partial \tau_1} k(t_1-\tau_1) d\tau_1 \right] d\tau = \\ &= \int_0^t k(t-\tau) \left\{ \frac{\partial}{\partial \tau} \left[-\frac{\partial k(t_1-\tau_1)}{\partial \tau_1} \right]_{\tau_1=\tau} \right\} d\tau = \\ &= \int_0^t k(t-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ e^{-\varepsilon(t_1-\tau)} [p \cos p(t_1-\tau) - \varepsilon \sin p(t_1-\tau)] \right\} d\tau. \end{aligned}$$

После дифференцирования, интегрирования и приведения подобных членов получим

$$\begin{aligned} I_4 &= \frac{p}{4} \left\{ e^{-\varepsilon(t_1+t)} \left[2 \sin p\Delta t - \frac{\omega_0^2 - 2\varepsilon^2}{\varepsilon p} \cos p\Delta t - \sin p(t_1 + t) - \frac{\varepsilon}{p} \cos p(t_1 + t) \right] + \right. \\ &\quad \left. + e^{-\varepsilon\Delta t} \left(\frac{p}{\varepsilon} \cos p\Delta t - \sin p\Delta t \right) \right\}. \end{aligned}$$

Подставляя далее эти интегралы в выражение (4) и распространяя результат на всю числовую ось, получаем

$$\begin{aligned} K_y(\tau) &= \frac{S_0}{4\varepsilon} e^{-\varepsilon|\tau|} \left[(\omega_0^2 + 4\varepsilon^2) \cos p\tau + \frac{\varepsilon}{p} (\omega_0^2 - 4\varepsilon^2) \sin p|\tau| \right] - \\ &\quad - \frac{S_0}{4p} e^{-\varepsilon(t_1+t)} \left[\frac{\omega_0^4 - 8\varepsilon^4}{p\varepsilon} \cos p\tau - 8\varepsilon^2 \sin p|\tau| + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\varepsilon}{p} (3\omega_0^2 + 4\varepsilon^2) \cos p(t_1 + t) + (\omega_0^2 + 4\varepsilon^2) \sin p(t_1 + t) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Полагая здесь $t_1 = t$ ($\tau = 0$), получаем выражение для дисперсии

$$\begin{aligned} D_y &= \frac{S_0}{4\varepsilon} \left\{ \omega_0^2 + 4\varepsilon^2 - p^{-2} e^{-2\varepsilon t} \left[\omega_0^4 - 8\varepsilon^4 + \varepsilon^2 (3\omega_0^2 + 4\varepsilon^2) \cos 2pt + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{p}{\varepsilon} (\omega_0^2 + 4\varepsilon^2) \sin 2pt \right] \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

По истечении определенного времени ($t \rightarrow \infty$) процесс становится стационарным и его корреляционная функция определяется первым слагаемым с квадратной скобкой в выражении (5), а дисперсия

$$D_y = (\omega_0^2 + 4\varepsilon^2)S_0/4\varepsilon.$$

Эти результаты легко получить из уравнения (1) спектральным методом:

$$S_y(\omega) = \frac{S_0}{2\pi} \frac{\omega_0^4 + 4\varepsilon^2 \omega^2}{A_2(\omega)A_2(-\omega)},$$

где $A_2(\omega) = \omega^2 - 2i\omega\varepsilon - \omega_0^2$.

Корреляционная функция стационарного процесса определяется выражением

$$K_y(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_y(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega. \quad (7)$$

Применяя теорему о вычетах, получаем

$$K_y(\tau) = \frac{S_0}{2\pi} 2\pi i \sum_{k=1}^2 \frac{\omega_0^4 + 4\varepsilon^2 \omega_k^2}{A_2'(\omega_k)A_2(-\omega_k)} e^{i\omega_k \tau},$$

где ω_k – полином $A_2(\omega)$:

$$\omega_1 = p + i\varepsilon, \quad \omega_2 = -p + i\varepsilon, \quad A_2' = 2(\omega - i\varepsilon).$$

После подстановки ω_k и алгебраических преобразований получаем

$$K_y(\tau) = \frac{S_0}{4\varepsilon} e^{-\varepsilon|\tau|} \left[(\omega_0^2 + 4\varepsilon^2) \cos p\tau + \frac{\varepsilon}{p} (\omega_0^2 - 4\varepsilon^2) \sin p|\tau| \right].$$

Рассмотрим теперь экспоненциально-коррелированное кинематическое воздействие:

$$m_{y_0} = 0, \quad K_{y_0}(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|}.$$

В этом случае корреляционные функции, входящие под знак интеграла, имеют вид ($u = \tau - \tau_1$)

$$K_{\dot{y}_0 y_0} = \frac{\partial K_{y_0}}{\partial \tau} = \sigma^2 \frac{\partial e^{-\alpha|u|}}{\partial |u|} \frac{d|u|}{du} \frac{du}{d\tau} = -\sigma^2 \alpha e^{-\alpha|u|} \text{sign} u;$$

$$K_{y_0 \dot{y}_0} = \frac{\partial K_{y_0}}{\partial \tau_1} = \sigma^2 \alpha e^{-\alpha|u|} \text{sign} u; \quad K_{y_0 \dot{y}_0} = \frac{\partial^2 K_{y_0}}{\partial \tau \partial \tau_1} = \sigma^2 \alpha e^{-\alpha|u|} [2\delta(u) - \alpha].$$

Здесь использованы следующие свойства обобщенных функций:

$$\frac{d|u|}{du} = \text{sign } u; \quad \frac{d(\text{sign } u)}{du} = 2\delta(u).$$

После подстановки этих выражений в (3) получаем

$$K_y = \frac{\sigma^2}{p^2} \int_0^t \int_0^t \left[\omega_0^4 + 8\alpha\varepsilon^2\delta(\tau - \tau_1) - 4\varepsilon^2\alpha^2 \right] k(t - \tau)k(t_1 - \tau_1)e^{-\alpha|\tau - \tau_1|} d\tau d\tau_1;$$

$$D_{y(t)} = \frac{\sigma^2}{p^2} \left\{ \left(\omega_0^4 - 4\varepsilon^2\alpha^2 \right) \int_0^t \int_0^t k(t - \tau)k(t - \tau_1)e^{-\alpha|\tau - \tau_1|} d\tau d\tau_1 + 8\varepsilon^2\alpha \int_0^t k^2(t - \tau) d\tau \right\} =$$

$$= \frac{\sigma^2}{p^2} \left[\left(\omega_0^4 - 4\varepsilon^2\alpha^2 \right) I_q + 8\varepsilon^2\alpha I_0 \right].$$

Вычислим интеграл I_q . Внутренний интеграл представим в виде суммы двух интегралов, не содержащих модуля:

$$e^{\tau(\varepsilon - \alpha)} \int_0^{\tau} \sin \rho(t - \tau_1) e^{(\alpha + \varepsilon)\tau_1} d\tau_1 + e^{(\alpha + \varepsilon)\tau} \int_{\tau}^t \sin \rho(t - \tau_1) e^{(\varepsilon - \alpha)\tau_1} d\tau_1.$$

С учетом того, что

$$I_1 = \int_0^t e^{at} \sin \rho(t - \tau) d\tau = \frac{pe^{at} - a \sin \rho t - \rho \cos \rho t}{\rho^2 + a^2},$$

$$I_2 = \int_0^t e^{2\varepsilon\tau} \sin \rho(t - \tau) \sin \rho\tau d\tau = \frac{p}{4\omega_0^2} \left[\sin \rho t + \frac{p}{\varepsilon} \cos \rho t + e^{2\varepsilon t} \left(\sin \rho t - \frac{p}{\varepsilon} \cos \rho t \right) \right],$$

$$I_3 = \int_0^t e^{2\varepsilon\tau} \sin \rho(t - \tau) \cos \rho\tau d\tau =$$

$$= \frac{p}{4\omega_0^2} \left[-\cos \rho t - \frac{p^2 + 2\varepsilon^2}{\varepsilon\rho} \sin \rho t + e^{2\varepsilon t} \left(\cos \rho t + \frac{p}{\varepsilon} \sin \rho t \right) \right],$$

после математических преобразований получаем

$$I_q = \frac{p^2(\alpha + 2\varepsilon)}{2\varepsilon\omega_0^2(\omega_0^2 + \alpha^2 + 2\varepsilon\alpha)} - \frac{2p[(\alpha + \varepsilon)\sin \rho t + \rho \cos \rho t]}{(\omega_0^2 + \alpha^2)^2 - 4\varepsilon^2\alpha^2} e^{-(\alpha + \varepsilon)t} +$$

$$+ \frac{\omega_0^2(\varepsilon - \alpha)/\varepsilon + (\omega_0^2 + \alpha\varepsilon - 2\varepsilon^2)\cos 2\rho t - p(\alpha - 2\varepsilon)\sin 2\rho t}{2\omega_0^2(\omega_0^2 + \alpha^2 - 2\varepsilon\alpha)} e^{-2\varepsilon t}.$$

Вычислим интеграл I_0 :

$$I_0 = \int_0^t \sin^2 p(t-\tau) e^{-2\varepsilon(t-\tau)} d\tau = \frac{1}{4\varepsilon\omega_0^2} \left[p^2 - (\omega_0^2 - \varepsilon^2 \cos 2pt + p\varepsilon \sin 2pt) e^{-2\varepsilon t} \right].$$

Теперь после математических преобразований имеем

$$\begin{aligned} D_{y(t)} = & \sigma^2 \left[\frac{\omega_0^2(\alpha + 2\varepsilon) + 4\varepsilon^2\alpha}{2\varepsilon(\omega_0^2 + \alpha^2 + 2\varepsilon\alpha)} - \frac{2(\omega_0^4 - 4\varepsilon^2\alpha^2)}{(\omega_0^2 + \alpha^2)^2 - 4\varepsilon^2\alpha^2} \times \right. \\ & \left. \times \left(\cos pt + \frac{\alpha + \varepsilon}{p} \sin pt \right) e^{-(\alpha + \varepsilon)t} \right] - \frac{\sigma^2 e^{-2\varepsilon t}}{2p^2(\omega_0^2 + \alpha^2 - 2\varepsilon\alpha)} \times \\ & \times \left\{ \omega_0^4(\alpha - \varepsilon)/\varepsilon + 4\varepsilon\alpha(\omega_0^2 + \varepsilon\alpha) - \left[\omega_0^4 + \varepsilon(\alpha - 2\varepsilon)\omega_0^2 - 4\varepsilon^2\alpha(\alpha - \varepsilon) \right] \cos 2pt + \right. \\ & \left. + p \left[\omega_0^2(\alpha - 2\varepsilon) + 4\varepsilon\alpha^2 \right] \sin 2pt \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Определим дисперсию относительно перемещения массы $\Delta = y_0 - y$:

$$D_{\Delta} = M \left\{ \left[y_{0(t)} - y(t) \right]^2 \right\} = D_{y_0} + D_y - 2K_{yy_0}.$$

Корреляционный момент с учетом решения (2) равен

$$K_{yy_0} = \frac{1}{p_0} \int_0^t k(t-\tau) \left\{ \omega_0^2 M \left[y_{0(t)} y_{0(\tau)} \right] + 2\varepsilon M \left[y_{0(t)} \dot{y}_{0(\tau)} \right] \right\} d\tau.$$

Здесь $M \left[y_{0(t)} y_{0(\tau)} \right] = K_{y_0}(t, \tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|t-\tau|}$;

$$M \left[y_{0(t)} \frac{\partial y_{0(\tau)}}{\partial \tau} \right] = \frac{\partial}{\partial \tau} M \left[y_{0(t)} y_{0(\tau)} \right] = \sigma^2 \frac{\partial}{\partial \tau} e^{-\alpha|t-\tau|} = \alpha \sigma^2 e^{-\alpha|t-\tau|} \text{sign}(t-\tau).$$

Учитывая, что под интегралом $t \geq \tau$, получаем

$$\begin{aligned} K_{yy_0} = & \frac{\sigma^2}{p_0} \int_0^t k(t-\tau) (\omega_0^2 + 2\varepsilon\alpha) e^{-\alpha(t-\tau)} d\tau = \\ = & \sigma^2 \frac{\omega_0^2 + 2\varepsilon\alpha}{\omega_0^2 + 2\varepsilon\alpha + \alpha^2} \left[1 - \left(\cos pt + \frac{\alpha + \varepsilon}{p} \sin pt \right) e^{-(\alpha + \varepsilon)t} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Дисперсия отклонения Δ в момент времени t_k с учетом формул (8) и (9) равна

$$D_{\Delta}(t_k) = \sigma^2 \left[\frac{\alpha(\omega_0^2 + 2\varepsilon\alpha)}{2\varepsilon(\omega_0^2 + \alpha^2 + 2\varepsilon\alpha)} + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2\alpha^2(\omega_0^2 + 2\varepsilon\alpha)}{(\omega_0^2 + \alpha^2)^2 - 4\varepsilon^2\alpha^2} \left(\cos \rho t_k + \frac{\alpha + \varepsilon}{p} \sin \rho t_k \right) e^{-(\alpha + \varepsilon)t_k} \Big] - \\
 & - \frac{\sigma^2 e^{-2\varepsilon t_k}}{2p^2(\omega_0^2 + \alpha^2 - 2\varepsilon\alpha)} \left\{ \omega_0^4(\alpha - \varepsilon)/\varepsilon + 4\varepsilon\alpha(\omega_0^2 + \varepsilon\alpha) - \right. \\
 & \left. - \left[\omega_0^4 + \varepsilon(\alpha - 2\varepsilon)\omega_0^2 - 4\alpha\varepsilon^2(\alpha - \varepsilon) \right] \cos 2\rho t_k + p \left[\omega_0^2(\alpha - 2\varepsilon) + 4\alpha\varepsilon^2 \right] \sin 2\rho t_k \right\}.
 \end{aligned}$$

При $t_k > t_s$ (после переходного процесса) имеем

$$D_\Delta = \frac{\sigma^2 \alpha (\omega_0^2 + 2\varepsilon\alpha)}{2\varepsilon (\omega_0^2 + \alpha^2 + 2\varepsilon\alpha)}.$$

Стандарт отклонения $\sigma_\Delta = \sqrt{D_\Delta}$.

Если рассматривается смещение основания, на котором установлен прибор, то $y_0(t)$ можно толковать как случайные флуктуации этого смещения. Тогда стандарт отклонения можно толковать как ошибку показаний прибора.

3. СТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМЫ

В этом случае целесообразно применить спектральный метод. Переходная функция, имеющая смысл динамической податливости, для уравнения (1) имеет вид

$$H(i\omega) = \frac{\omega_0^2 + 2i\varepsilon\omega}{\omega_0^2 + 2\varepsilon i\omega - \omega^2}, \quad (10)$$

а спектральная плотность решения определяется по формуле

$$S_{y(\omega)} = |H(\omega)|^2 S_h(\omega) = \frac{\omega_0^4 + 4\varepsilon^2\omega^2}{A_{2(\omega)}A_{2(-\omega)}} S_{h(\omega)}, \quad (11)$$

где $S_h(\omega)$ – спектральная плотность кинематического воздействия.

Корреляционная функция решения при необходимости находится преобразованием Фурье по формуле (7).

Часто для расчета элемента конструкций достаточно знать дисперсию колебаний:

$$D_y = K_{y(0)} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{y(\omega)} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega_0^4 + 4\varepsilon^2\omega^2}{L(i\omega)L(-i\omega)} S_{h(\omega)} d\omega. \quad (12)$$

Вычисление этого интеграла сводится к вычислению стандартного интеграла вида

$$I_n = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_n(\omega)}{A_n(\omega)A_n(-\omega)} d\omega, \quad (13)$$

где $B_{n(\omega)}$ и $A_{n(\omega)}$ – полиномы с комплексными коэффициентами:

$$A_{n(\omega)} = a_0\omega^n + a_1\omega^{n-1} + \dots + a_{n-1}\omega + a_n;$$

$$B_{n(\omega)} = b_0\omega^{2n-2} + b_1\omega^{2n-4} + \dots + b_{n-2}\omega^2 + b_{n-1}.$$

Все корни $A_{n(\omega)}$ должны лежать в верхней полуплоскости. Формулы для интегралов (13) при различных n приведены в работе [19].

Примером стационарных колебаний могут быть колебания подвески автомобиля. Динамическая модель имеет вид, показанный на рисунке, где m – подрессоренная масса, приходящаяся на одну подвеску; y_0 – кинематическое воздействие, зависящее от высоты микропрофиля дороги $h(x)$. Путем статистической обработки результатов замера микропрофилей различного класса дорог в работе [20] воздействие дороги на подвеску автомобиля рассматривается как стационарный случайный процесс, который носит экспоненциально-коррелированный или косинусоидальный характер.

Такая задача рассмотрена в работе [21]. Спектральные плотности указанных процессов имеют вид

$$S_h(\omega) = \frac{\sigma^2}{\pi} \frac{\alpha}{\omega^2 + \alpha^2}, \quad S_{\dot{h}}(\omega) = \frac{\alpha\sigma^2}{\pi} \frac{\omega^2 + \beta^2 + \alpha^2}{(\omega^2 - \beta^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}, \quad (14)$$

где σ – стандарт высоты неровностей; α – коэффициент широкополостности процесса; β – несущая частота.

Подставляя первое выражение (14) в (11) и применяя преобразование (7), после ряда математических выкладок получаем корреляционную функцию перемещения

$$K_y = \frac{\sigma^2}{(\omega_0^2 + \alpha^2)^2 - 4\varepsilon^2\alpha^2} \left\{ \frac{\alpha}{2\varepsilon} e^{-\varepsilon|\tau|} \left[(\omega_0^4 + \omega_0^2\alpha^2 + 4\varepsilon^2\alpha^2) \cos \rho\tau + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{\varepsilon}{\rho} (3\omega_0^4 + \omega_0^2\alpha^2 - 4\varepsilon^2\alpha^2) \sin \rho|\tau| \right] + (\omega_0^4 - 4\varepsilon^2\alpha^2) e^{-\alpha|\tau|} \right\}.$$

При $\tau = 0$ находим дисперсию

$$D_y = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon} \frac{\omega_0^2(\alpha + 2\varepsilon) + 4\alpha\varepsilon^2}{\omega_0^2 + \alpha^2 + 2\varepsilon\alpha}. \quad (15)$$

Для косинусоидального процесса приведем определение дисперсии колебаний подвески. Для этого второе выражение (14) подставим в интеграл (12). После ряда математических преобразований получим

$$D_y = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon} \frac{\alpha(\omega_0^2 + a^2)(\omega_0^2 + 4\varepsilon^2) + 2\varepsilon\omega_0^2(\omega_0^2 + 2\alpha^2 + 2\alpha\varepsilon) + 8\varepsilon^3 a^2}{4(\alpha + \varepsilon)(\alpha\omega_0^2 + \varepsilon a^2) + (\omega^2 - a^2)^2},$$

где $a^2 = \alpha^2 + \beta^2$.

При $\beta = 0$ совпадают спектральные плотности (14); в этом случае ($a^2 = \alpha^2$) это выражение совпадает с дисперсией (15).

В работе [21] показано использование вероятностных характеристик перемещения массы для оценки вероятности «пробоя» подвески и определения вероятностных характеристик динамической составляющей нагрузки в подвеске, которая является случайной функцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен анализ колебаний механической системы с одной степенью свободы при случайных кинематических воздействиях. Приведены общие выражения для определения математического ожидания и корреляционной функции в общем случае нестационарного случайного кинематического воздействия. Рассмотрены переходные процессы в системе при стационарных возбуждениях в виде «белого шума» и экспоненциально-коррелированного процесса и определены вероятностные характеристики выходного процесса и относительного перемещения массы.

Спектральным методом выполнен анализ стационарных колебаний системы при стационарных случайных кинематических воздействиях. В качестве примера приведены вероятностные характеристики колебаний подвески автомобиля от воздействия случайного микропрофиля дороги. При этом случайное воздействие описано экспоненциально-коррелированным процессом и косинусоидальным процессом.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при расчете и проектировании систем виброзащиты оборудования и рабочих мест от случайных кинематических воздействий, а также для оценки погрешности показаний приборов и аппаратуры, установленных на основаниях, испытывающих случайные вибрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамические свойства линейных виброзащитных систем / под ред. К.В. Фролова. – М.: Наука, 1982. – 205 с.
2. Вольперт Э.Г. Динамика амортизаторов с нелинейными упругими элементами. – М.: Машиностроение, 1972. – 136 с.
3. Крюкова И.В., Ургалова Г.Б. Исследование колебаний системы с двумя степенями свободы при кинематическом возбуждении // Сборник трудов 52 научно-технической конференции МИРЭА. – М., 2003. – С. 88–94.
4. Kotera T., Shintani M. Chaotic and periodic motions in a vibro-impacting system // JSME International Journal Series C. – 2003. – Vol. 46, N 2. – P. 659–665.
5. Рыков А.А., Юрьев Г.С., Ненев Ю.В. Пассивная виброзащита и автоматическое управление // Вестник машиностроения. – 2006. – № 6. – С. 24–25.
6. Мондрус В.Л., Смирнов В.А. Численное моделирование систем виброзащиты трансмиссионного электронного микроскопа // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 6. – С. 48–49.
7. Голоцанов В.М. Виброзащитные системы в вероятностном поле нагружения. – Пенза: Изд-во Пенз. технол. акад., 2006. – 135 с.
8. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. – 336 с.
9. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.

10. Диментберг М.Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний. – М.: Наука, 1980. – 368 с.
11. Бакиров Ж.Б. Вероятностные методы расчета элементов конструкций. – Караганда: КарГТУ, 2001. – 186 с.
12. Kundu A., Adhikari S. Transient response of structural dynamic systems with parametric uncertainty // Journal of Engineering Mechanics. – 2014. – Vol. 140, iss. 2. – P. 315–331.
13. Namachchivaya N. Random dynamical systems: addressing uncertainty, nonlinearity and predictability // Meccanica. – 2016. – Vol. 51, iss. 12. – P. 2975–2995.
14. Sun W., Zhou J., Gong D. Random vibration analysis on vertical vehicle-track coupled system with Timoshenko beam model // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 50, iss. 18. – P. 134–141.
15. Таженова Г.Д. Виброзащита объекта при импульсных кинематических воздействиях // Труды Международной научной конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан – 2030». – Караганда, 2009. – Вып. 2. – С. 273–276.
16. Бакиров Ж.Б., Таженова Г.Д. Имитационное моделирование систем виброзащиты колесного транспорта // Труды Международного симпозиума «Информационно-коммуникационные технологии в индустрии, образовании и науке». – Караганда, 2010. – Ч. 1. – С. 90–93.
17. Бакиров Ж.Б., Таткеева Г.Г., Ахмедиев С.К. Виброзащита оператора транспортных средств // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 2. – С. 7–19.
18. Бакиров Ж.Б., Бакиров М.Ж., Таженова Г.Д. Расчет систем виброзащиты при случайных воздействиях // Труды Университета. – Караганда: КарГТУ, 2015. – № 2. – С. 91–94.
19. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1981. – 351 с.
20. Яценко Н.Н. Колебания, прочность и форсированные испытания грузовых автомобилей. – М.: Машиностроение, 1972. – 372 с.

Бакиров Жетписбай Бакирович, доктор технических наук, профессор Карагандинского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – динамика и прочность машин. Имеет около 220 публикаций, в том числе 9 монографий. E-mail: bakirov_50@mail.ru

Бакиров Мадди Жетписбаевич, кандидат технических наук, доцент Карагандинского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – механика деформируемого твердого тела. Имеет 58 публикаций. E-mail: Madybacirov@rambler.ru

Таженова Гульзада Даулетхановна, кандидат технических наук, доцент Карагандинского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – виброизоляция оборудования. Имеет 35 публикаций. E-mail: gulzada_2604@mail.ru

Филиппова Татьяна Силиньевна, кандидат технических наук, профессор Карагандинского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – машиностроение. Имеет 50 публикаций. E-mail: confucius_kstu@mail.ru

Bakirov Zhetpisbai Bakirovich, D.Sc. (Eng.), a professor at the Karaganda State Technical University. His research interests are focused on dynamics and strength of machines. He is the author of about 220 publications including 9 monographs. E-mail: bakirov_50@mail.ru

Bakirov Madi Zhetpisbaevich, PhD (Eng.), an associate professor at the Karaganda State Technical University. His research interests are focused on mechanics of deformable solid body. He is the author of 58 publications. E-mail: Madybacirov@rambler.ru

Tazhenova Gulzada Daulethanovna, PhD (Eng.), an associate professor at the Karaganda State Technical University. His research interests are focused on vibroinsulation of equipment. She has published 35 research papers. E-mail: gulzada_2604@mail.ru

Filippova Tatyana Silinieva, PhD (Eng.), a professor at the Karaganda State Technical University. His research interests are focused on machine building. She is the author of about 50 publications. E-mail: confucius_kstu@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-7-20

Vibration of mechanical systems under random kinematic action*Zh.B. BAKIROV^a, M.Zh. BAKIROV^b, G.D. TAZHENOVA^c, T.S. FILIPPOVA^d

Karaganda State Technical University, 56, Boulevard Mira, Karaganda, 100027, Kazakhstan

^a bakirov_50@mail.ru ^b Madybacirov@rambler.ru ^c gulzada_2604@mail.ru^d confucius_kstu@mail.ru**Abstract**

The work is devoted to the study of linear vibrations of a mechanical system with one degree of freedom under random kinematic action. The problem is solved by the Green function method for the general case of non-stationary effects. Using the theory of random functions general expressions for determining the mathematical expectation and correlation function of the output process were obtained. Non-stationary vibrations of the system under stationary excitations of two types are considered, namely in the form of "white noise" and an exponentially-correlated process. Expressions for the correlation function and the dispersion of the output process are determined for these actions. An expression for the dispersion of a relative mass transfer is also defined. This mode of vibration is characteristic of transition processes in the system. A transition to the steady state vibration of the system was made by increasing the observation time.

The problem of stationary vibrations of the system under stationary random kinematic actions was solved by the spectral method. The solution is used to determine the probability characteristics of vibrations of vehicle suspension from the effects of a random microprofile of the road. At the same time the kinematic effect is represented by two types of random processes: an exponentially correlated process and a cosine process. Based on the solution of the problem, general expressions can be obtained for determining the spectral density and the correlation function of the dynamic component of the force in the suspension. Specific expressions for an exponentially-correlated process are obtained.

The results of the work can be used in the calculation and design of vibration protection systems for equipment and workplaces from random kinematic actions as well as for estimating an error in the readings of instruments and equipment installed on the supports experiencing random vibrations.

Keywords: random action, dynamic model, kinematic action, Green function, correlation function, spectral density, dispersion, spectral method, vibration protection

REFERENCES

1. Frolov K.V., ed. *Dinamicheskie svoystva lineinykh vibrozashchitnykh sistem* [Dynamic properties of linear vibration protection systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 205 p.
2. Vol'pert E.G. *Dinamika amortizatorov s nelineinymi uprugimi elementami* [The dynamics of shock absorbers with nonlinear elastic elements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 136 p.
3. Kryukova I.V., Ugalova G.B. [Investigation of oscillations of a system with two degrees of freedom with kinematic excitation]. *Sbornik trudov 52-i nauchno-tehnicheskoi konferentsii MIREA* [Transaction of papers of the 52nd Scientific and Technical Conference MIREA]. Moscow, 2003, pp. 88–94. (In Russian).
4. Kotera T., Shintani M. Chaotic and periodic motions in a vibro-impacting system. *JSME International Journal Series C*, 2003, vol. 46, no. 2, pp. 659–665.
5. Rykov A.A., Yur'ev G.S., Nenev Yu.V. Passivnaya vibrozashchita i avtomaticheskoe upravlenie [Passive vibration protection and automatic control]. *Vestnik mashinostroeniya – Bulletin of Mechanical Engineering*, 2006, no. 6, pp. 24–25.
6. Mondrus V.L., Smirnov V.A. Chislennoe modelirovanie sistem vibrozashchity transmissionnogo elektronnoego mikroskopa [Numerical simulation of transmission electron microscope's vibro-protection system]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2012, no. 6, pp. 48–49.

* Received 10 September 2018.

7. Goloshchanov V.M. *Vibrozhachitnye sistemy v veroyatnostnom pole nagruzheniya* [Vibration protection systems in a probabilistic loading field]. Penza, Penzenskaya tekhnologicheskaya akademiya Publ., 2006. 135 p.
8. Bolotin V.V. *Sluchainye kolebaniya uprugikh sistem* [Random oscillations of elastic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 336 p.
9. Svetlitskii V.A. *Sluchainye kolebaniya mekhanicheskikh sistem* [Random oscillations of mechanical systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 320 p.
10. Dimentberg M.F. *Nelineinye stokhasticheskie zadachi mekhanicheskikh kolebanii* [Nonlinear stochastic problems of mechanical oscillations]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 368 p.
11. Bakirov Zh.B. *Veroyatnostnye metody rascheta elementov konstruksii* [Probabilistic methods for calculating structural elements]. Karaganda, KarGTU Publ., 2001. 186 p.
12. Kundu A., Adhikari S. Transient response of structural dynamic systems with parametric uncertainty. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, vol. 140, iss. 2, pp. 315–331.
13. Namachchivaya N. Random dynamical systems: addressing uncertainty, nonlinearity and predictability. *Meccanica*, 2016, vol. 51, iss. 12, pp. 2975–2995.
14. Sun W., Zhou J., Gong D. Random vibration analysis on vertical vehicle-track coupled system with Timoshenko beam model. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, vol. 50, iss. 18, pp. 134–141.
15. Tazhenova G.D. [Vibration protection of an object under impulse kinematic influences]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: "Nauka i obrazovaniye – vedushchiy faktor strategii "Kazakhstan – 2030"* [Proceedings of the International scientific conference "Science and education as a leading factor in strategy "Kazakhstan – 2030"]. Karaganda, 2009, iss. 2, pp. 273–276. (In Russian).
16. Bakirov Zh.B., Tazhenova G.D. [Simulation modeling of vibration protection systems for wheeled transport]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Informatsionno-kommunikatsionnyye tekhnologii v industrii, obrazovanii i nauke»* [Proceedings of the International Symposium "Information and communication technologies in industry, education and science"]. Karaganda, 2010, pt. 1, pp. 90–93. (In Russian).
17. Bakirov Zh.B., Akhmediyev S.K., Tatkeeva G.G. Vibrozashchita operatora transportnykh sredstv [Vibroprotection of transport vehicle operators]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 2, pp. 7–19.
18. Bakirov Zh.B., Bakirov M.Zh., Tazhenova G.D. Raschet sistem vibrozashchity pri sluchainykh vozddeistviyakh [Calculation of vibration protection systems under random effects]. *Trudy universiteta – University's works*, 2015, no. 2, pp. 91–94.
19. Bolotin V.V. *Metody teorii veroyatnostei i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenii* [Methods of probability theory and reliability theory in the calculations of structures]. Moscow, Stroizdat Publ., 1981. 351 p.
20. Yatsenko N.N. *Kolebaniya, prochnost' i forsirovannye ispytaniya gruzovykh avtomobilei* [Fluctuations, strength and accelerated testing of trucks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 372 p.

Для цитирования:

Колесания механических систем при случайных кинематических возбуждениях / Ж.Б. Бакиров, М.Ж. Бакиров, Г.Д. Таженова, Т.С. Филиппова // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-7-20.

For citation:

Bakirov Zh.B., Bakirov M.Zh., Tazhenova G.D., Filippova T.S. Kolebaniya mekhanicheskikh sistem pri sluchainykh kinemacheskikh vozbuzhdeniyakh [Vibration of mechanical systems under random kinematic action]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 7–20. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-7-20.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.51:519.6

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-21-40

Двухэтапный устойчивый алгоритм непараметрической идентификации системы с высоким уровнем шума входного сигнала*

Ю.Е. ВОСКОБОЙНИКОВ^{1,2,a}, Д.А. КРЫСОВ^{1,b}

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

² 630008, РФ, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

^a voscob@mail.ru ^b Tomahawk.RUS@gmail.com

В качестве модели стационарной динамической системы часто выступает интегральное уравнение Вольтера первого рода с разностным ядром. Для такой модели задача непараметрической идентификации заключается в оценивании этого разностного ядра (называемого импульсной переходной функцией) по измеренным значениям входного и выходного сигналов идентифицируемой динамической системы. Как известно, эта задача является некорректно поставленной, т. е. решения может не существовать, оно может быть не единственным и обладать неустойчивостью по отношению к погрешностям (шумам измерения) исходных данных. Для получения единственного устойчивого (но приближенного) решения используются различные методы регуляризации (в частности, метод регуляризации А.Н. Тихонова). Вычислительной основой алгоритмов, реализующих эти методы, является дискретное преобразование Фурье (ДПФ). При этом предполагается, что входной сигнал (ядро интегрального уравнения) задан точно, а выходной сигнал системы регистрируется с некоторой случайной ошибкой. Однако такое предположение редко выполняется на практике, так как входной и выходной сигналы системы измеряются и регистрируются приборами и, следовательно, задаются со случайными погрешностями – с шумами измерений. В данной работе предлагается двухэтапный устойчивый алгоритм непараметрической идентификации импульсной переходной функции стационарной динамической системы в случае, когда входной и выходной сигналы идентифицируемой системы регистрируются со случайными погрешностями. На первом этапе осуществляется вейвлет-фильтрация зашумленного входного сигнала. Для этого используются пороговые алгоритмы обработки коэффициентов вейвлет-разложения зашумленного сигнала. Для минимизации ошибки фильтрации пороговые значения вычисляются на основе статистического критерия оптимальности алгоритма фильтрации. На втором этапе к отфильтрованному входному сигналу применяется регуляризирующий алгоритм, использующий дискретное преобразование Фурье. Для минимизации ошибки идентификации на этом этапе для выбора параметра регуляризации используется алгоритм, позволяющий эффективно оценить оптимальное значение параметра регуляризации. В работе исследуется степень влияния уровней погрешно-

* Статья получена 20 августа 2018 г.

стей входного и выходного сигналов на ошибку идентификации. Приводятся и обсуждаются результаты вычислительного эксперимента. Иллюстрируется эффективность предлагаемого подхода к построению устойчивого алгоритма непараметрической идентификации импульсной переходной функции стационарной динамической системы при различных уровнях шума измерения входного и выходного сигналов идентифицируемой системы.

Ключевые слова: непараметрическая идентификация, некорректно поставленные задачи, интегральное уравнение Вольтера первого рода, пороговые алгоритмы вейвлет-фильтрации, оценивание оптимальных пороговых величин, регуляризирующий алгоритм, оценивание оптимального параметра регуляризации, зависимость ошибки идентификации от шумов измерений

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее часто в качестве математической модели стационарной динамической системы используется интегральное уравнение Вольтера первого рода с разностным ядром:

$$\int_0^t k(t-\tau)\varphi(\tau)d\tau = f(t), \quad (1)$$

где $k(\tau)$ – импульсная переходная функция (ИПФ) динамической системы (ядро интегрального уравнения (1)); $\varphi(\tau)$, $f(t)$ – входной и выходной сигналы системы. Как известно, задача непараметрической идентификации заключается в построении оценки для ИПФ системы по зарегистрированным значениям сигналов $\varphi(\tau)$, $f(t)$ [1, 2]. Эта задача относится к классу некорректно поставленных задач, когда могут нарушаться условия корректности по Адамару. В частности, появляется неустойчивость решения интегрального уравнения к погрешностям задания выходного сигнала $f(t)$ [3].

Для нахождения единственного и устойчивого решения обратной измерительной задачи (т. е. решения уравнения (1) относительно функции $\varphi(\tau)$) используются различные методы регуляризации – как детерминированные [4, 5], так и статистические [6]. При этом, как правило, предполагается, что правая часть известна с некоторой погрешностью, а ядро $k(\tau)$ уравнения (1) задано точно. Эти же методы можно использовать и для решения сформулированной задачи непараметрической идентификации, но уже в этом случае ядром уравнения будет входной сигнал системы $\varphi(\tau)$. В этом случае делается аналогичное предположение, что входной сигнал идентифицируемой системы задан точно. Однако такое требование редко выполняется на практике, так как входной и выходной сигналы системы измеряются со случайными погрешностями – с шумами измерений.

В работе [7] предполагалось, что измеренные значения выходного и входного сигналов $\tilde{f}(t_i)$, $\tilde{\varphi}(\tau_j)$ допускают представления:

$$\tilde{f}_i = \tilde{f}(t_i) = f(t_i) + \eta(t_i), \quad \tilde{\varphi}_j = \varphi(\tau_j) + \zeta(\tau_j), \quad (2)$$

где $\eta(t_i)$, $\zeta(\tau_j)$ – случайные, не коррелированные друг с другом величины (шумы измерений) с нулевыми средними и дисперсиями σ_η^2 , σ_ζ^2 .

При этих предположениях были исследованы свойства устойчивых решений, построенных с использованием регуляризирующего алгоритма (назовем его «традиционным»), который как при построении решения, так и при выборе параметра регуляризации не учитывал шум измерения входного сигнала. Но при этом на «вход» алгоритма подавались зашумленные значения $\tilde{f}_i, \tilde{\varphi}_j$. Показано, что если относительный уровень шума измерения входного сигнала меньше или одинаков с уровнем шума выходного сигнала, то для оценивания оптимального параметра регуляризации можно использовать статистический критерий оптимальности, в котором шум измерения входного сигнала не учитывается. В противном случае шум измерения входного сигнала необходимо учитывать как при выборе параметра регуляризации, так и при построении регуляризованного решения, что существенно усложняет регуляризирующий алгоритм идентификации [8, 9]. Возникает вопрос: как построить процедуру идентификации, чтобы использовать более простой «традиционный» регуляризирующий алгоритм (РА), но при этом получить более точные решения? Так как ошибка регуляризованного решения напрямую зависит от уровней шумов измерения сигналов, то один из возможных вариантов ответа – использовать некоторую предобработку измеренных сигналов, отвечающую двум требованиям:

- значительное (в разы) снижение уровней шумов измерения;
- внесение минимальной систематической ошибки в результат фильтрации (неизбежной в процедурах фильтрации зашумленных сигналов).

Поэтому в данной работе решается *задача построения двухэтапного устойчивого алгоритма непараметрической идентификации*, где на первом этапе осуществляется вейвлет-фильтрация шумов измерения, а на втором этапе – построение регуляризованного решения «традиционным» РА по «отфильтрованным» значениям входного и выходного сигналов идентифицируемой системы. При этом исследуется степень влияния на ошибку решения уровней шумов входного и выходного сигналов, а также рассматривается несколько схем фильтрации на первом этапе.

1. ДВУХЭТАПНЫЙ АЛГОРИТМ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

На первом этапе для уменьшения уровней шумов входного или выходного сигналов идентифицируемой системы (возможно, и входного, и выходного) предлагается использовать пороговые алгоритмы вейвлет-фильтрации. Эти алгоритмы позволяют с меньшей систематической ошибкой (по сравнению с алгоритмами фурье-фильтрации) фильтровать шумы различной статистической природы и имеют высокую вычислительную эффективность. Алгоритмы основаны на следующем многомасштабном представлении сигнала $f(t)$ [10, 11]:

$$\hat{f}(t) = \sum_k a_{j_0+J,k} \Phi_{j_0+J,k}(t) + \sum_{j=j_0+1}^{j_0+J} \sum_k d_{j,k} \Psi_{j,k}(t),$$

которое можно интерпретировать как восстановление сигнала $f(t)$ по его коэффициентам разложения на J -м уровне. Функции $\{\varphi_{j,k}(t)\}$ называют масштабирующими (или отцовскими), а функции $\{\psi_{j,k}(t)\}$ – вейвлет-функциями (или материнскими). Переменная j характеризует уровень разложения, и ее часто называют коэффициентом масштаба; переменная k – временной сдвиг той или иной базисной функции; величина J задает количество уровней разложения; j_0 – начальный уровень разложения (подробнее см. [12]). Коэффициенты разложения $a_{j,k}$ называют аппроксимирующими, $d_{j,k}$ – детализирующими, и они определяются выражениями:

$$a_{j,k} = \int f(t)\varphi_{j,k}(t)dt, \quad d_{j,k} = \int f(t)\psi_{j,k}(t)dt.$$

Напомним (подробнее см. [12]), что пороговый алгоритм вейвлет-фильтрации можно условно представить следующими шагами.

Шаг 1. Вычисление прямого дискретного вейвлет-преобразования (нахождение коэффициентов разложения по зашумленным значениям дискретного сигнала).

Шаг 2. Обработка «зашумленных» коэффициентов разложения (устранение шумовой составляющей).

Шаг 3. Вычисление обратного дискретного вейвлет-преобразования (нахождение «сглаженных» значений дискретной функции).

Обозначим коэффициенты разложения зашумленного сигнала $\tilde{f}(t)$ как $\tilde{a}_{j,k}$, $\tilde{d}_{j,k}$. Заметим, что относительные погрешности аппроксимирующих коэффициентов на порядок и более меньше погрешностей коэффициентов $\tilde{d}_{j,k}$ (см. [12], с. 58–60). Поэтому на практике обработке подвергаются только детализирующие коэффициенты $\tilde{d}_{j,k}$.

Очевидно, что качество фильтрации зашумленного сигнала определяется алгоритмами обработки на втором шаге, где строятся оценки для неизвестных «точных» коэффициентов разложения. Большинство используемых алгоритмов носит пороговый характер: коэффициент разложения меньший по абсолютной величине некоторой пороговой величины зануляется, в противном случае коэффициент сохраняется или подвергается некоторому (в общем случае нелинейному) преобразованию. Распространение на практике получили однопараметрические пороговые функции, зависящие только от одного параметра – величины порога (подробнее см. [12]). В нашем случае будем использовать две функции, которые эффективно удаляют шумы различной статистической природы (подробнее см. [13]):

- «жесткая» пороговая функция вида

$$T_H(\tilde{d}_{j,k}, \lambda) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\tilde{d}_{j,k}| \leq \lambda, \\ \tilde{d}_{j,k}, & \text{если } |\tilde{d}_{j,k}| > \lambda; \end{cases} \quad (3)$$

- пороговая функция $T_{HYP}(\tilde{d}, \lambda)$ вида

$$T_{HYP}(\tilde{d}_{j,k}, \lambda) = \begin{cases} \text{sign}(\tilde{d}_{j,k}) \sqrt{\tilde{d}_{j,k}^2 - \lambda^2}, & \text{если } |\tilde{d}_{j,k}| \geq \lambda, \\ 0, & \text{если } |\tilde{d}_{j,k}| < \lambda, \end{cases} \quad (4)$$

где λ – величина порога. Графики этих функций (вычисленные при $\lambda = 1$) показаны на рис. 1 (сплошная кривая – функция (3), штриховая – функция (4)).

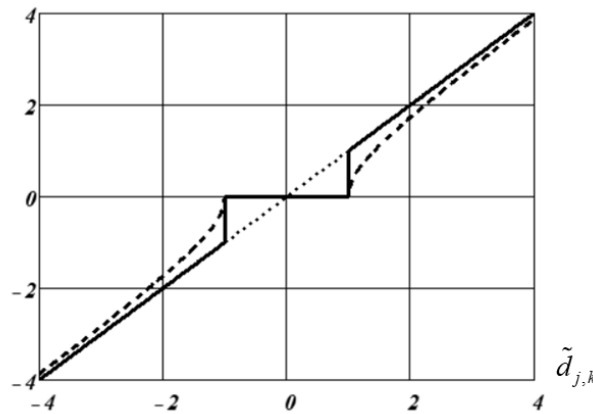


Рис. 1. Графики пороговых функций (3), (4)

Fig. 1. Graphs of threshold functions (3), (4)

В операторном виде алгоритм вейвлет-фильтрации можно представить в виде

$$\hat{f}_\lambda = W^{-1} [T_\lambda (W \tilde{f})], \quad (5)$$

где W, W^{-1} – операторы прямого и обратного вейвлет-преобразования; $T_\lambda(\cdot)$ – оператор, реализующий пороговый алгоритм обработки коэффициентов вейвлет-разложения при заданном пороге λ и выбранной пороговой функции; \tilde{f} – дискретный зашумленный сигнал (вектор), сформированный из значений «зашумленной» функции $\hat{f}(t)$; \hat{f}_λ – результат вейвлет-фильтрации (тоже вектор). Предполагается, что $\tilde{f} = f + \eta$, где f – «точный» вектор, η – вектор шума измерения с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

Очевидно, что выбор пороговой величины существенно влияет на ошибку фильтрации, и эта пороговая величина, по сути, является управляющим параметром алгоритмов вейвлет-фильтрации. Сравнение различных алгоритмов выбора порога λ выполнено в работах [12, 14]. Очевидно, что хотелось бы найти оптимальное значение λ_{opt} , которое минимизирует среднеквадрат-

тическую ошибку фильтрации. Приведем основные соотношения алгоритма выбора, позволяющего достаточно точно оценить λ_{opt} (подробнее см. [12]).

Введем статистику:

$$\rho_W(\lambda) = \frac{1}{\sigma^2} \langle e_\lambda, \tilde{f} \rangle,$$

где $\langle e_\lambda, \tilde{f} \rangle$ – скалярное произведение двух векторов; $e_\lambda = \tilde{f} - \hat{f}_\lambda$ – вектор невязки. В качестве оценки для λ_{opt} принимается величина λ_W , для которой выполняется неравенство

$$\mathfrak{G}_{\gamma/2, N} \leq \rho_W(\lambda_W) \leq \mathfrak{G}_{1-\gamma/2, N}, \quad (6)$$

где $\mathfrak{G}_{\gamma/2, N}$ и $\mathfrak{G}_{1-\gamma/2, N}$ – квантили χ^2 -распределения с числом степеней свободы N уровней $\gamma/2$, $1-\gamma/2$ соответственно; N – число значений фильтруемой функции; $\gamma=0.05$ – вероятность ошибки первого рода при проверке статистической гипотезы об оптимальности пороговой величины (подробнее см. [12]). Как показали проведенные исследования [12], увеличение среднеквадратической ошибки фильтрации при $\lambda = \lambda_W$ по сравнению с $\lambda = \lambda_{\text{opt}}$ не превышает 10 %, что позволяет сделать вывод о высокой точности оценивания оптимальной пороговой величины λ_{opt} .

На втором этапе строится регуляризирующий алгоритм вычисления оценки для ИПФ. Кратко изложим основные вычислительные моменты этого алгоритма.

Предположим, что заданы зашумленные значения входного и выходного сигналов, определяемые выражением (2), и шаг дискретизации по аргументам t и τ одинаков и равен Δ_t . Тогда, используя метод прямоугольников, интегральное уравнение (1) заменяется дискретной сверткой

$$\sum_{j=1}^{N_k} \tilde{\varphi}(t_i - \tau_j) k(\tau_j) \Delta_t = \tilde{f}(t_i), \quad i=1, \dots, N_f, \quad (7)$$

которая при соответствующем выборе шага дискретизации Δ_t хорошо аппроксимирует исходное уравнение (1). Построение регуляризованного решения на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) можно представить следующими «укрупненными» шагами (подробнее см. [15]).

Шаг 1. Формирование по дискретным значениям $\tilde{f}_i = \tilde{f}(t_i)$, $i=0, \dots, N_f-1$, $\tilde{\varphi}_j = \tilde{\varphi}(\tau_j)$, $j=0, \dots, N_\varphi-1$, периодических последовательностей $\tilde{f}_p(i)$, $\tilde{\varphi}_p(i)$, $i=0, \dots, N-1$, где N – величина периода, и далее выполняется вычисление коэффициентов ДПФ $\tilde{F}_p(l)$, $\tilde{\Phi}_p(l)$, $l=0, \dots, N-1$.

Шаг 2. Вычисление коэффициентов ДПФ $K_{p\alpha}(l)$, $l = 0, \dots, N - 1$, регуляризованного решения.

Шаг 3. Вычисление периодического регуляризованного решения $\hat{k}_{p\alpha}(i)$, $i = 0, \dots, N - 1$ (взятием обратного ДПФ от последовательности $\{K_{p\alpha}(l)\}$) и формирование вектора непериодического регуляризованного решения $\hat{k}_{\alpha j}$, $j = 0, \dots, N_k - 1$ как оценка для значений решения интегрального уравнения в дискретные моменты времени: $k(\tau_j)$, $j = 0, \dots, N_k - 1$.

Очевидно, что точность регуляризованного решения определяется способом вычисления $K_{p\alpha}(l)$ на втором шаге. Если предположить, что уровень шума измерения входного сигнала меньше уровня шума выходного сигнала, то в этом случае эти коэффициенты ДПФ можно (как показано в работе [24]) находить на основе «традиционного» регуляризирующего алгоритма вида

$$K_{p\alpha}(l) = \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + \alpha Q_p(l)} \tilde{F}_p(l), \quad l = 0, \dots, N - 1, \quad (8)$$

где α – параметр регуляризации; $\tilde{\Phi}_p^c(l)$ – величина, комплексно-сопряженная с $\tilde{\Phi}_p(l)$. Элементы последовательности $\{Q_p(l)\}$ формируются по правилу

$$Q_p(l) = \begin{cases} Q(l \cdot \Delta_\omega), & l = 0, \dots, N / 2; \\ Q((N - l) \cdot \Delta_\omega), & l = N / 2 + 1, \dots, N - 1, \end{cases}$$

где $\Delta_\omega = 2\pi / (N\Delta_t)$ – шаг дискретизации в частотной области. Функцию $Q(\omega)$ можно трактовать как частотную характеристику стабилизирующего функционала: она должна быть неубывающей функцией частоты ω , и чаще всего $Q(\omega) \rightarrow \infty$ при $\omega \rightarrow \infty$ (например, см. [15]). Если задан порядок регуляризации r , то при достаточно больших значениях ω справедлива асимптотика $Q(\omega) \approx \omega^{2r}$.

В операторной форме изложенный регуляризирующий алгоритм можно представить в виде

$$\hat{k}_\alpha = F^{-1} \{R_\alpha [F(\tilde{\Phi}), F(\tilde{f})]\}, \quad (9)$$

где $F(\tilde{\Phi})$, $F(\tilde{f})$ – прямое ДПФ измеренных входного и выходного сигналов; $R_\alpha(\cdot)$ – вычисление регуляризованных коэффициентов ДПФ ИПФ (реализация алгоритма (8)), где используются ДПФ входного и выходного сигнала; $F^{-1}(\cdot)$ – обратное дискретное преобразование Фурье.

Проблема выбора параметра регуляризации α является основной при использовании регуляризирующих алгоритмов на практике. Дело в том, что

при заниженных значениях α в решении $k_\alpha(\tau)$ будут присутствовать шумовые составляющие, обусловленные шумом правой части $\eta(t)$. При завышенных значениях α из решения $k_\alpha(\tau)$ будут «удалены» информативные компоненты функции $k(\tau)$. Поэтому в качестве оптимального значения α_{opt} примем значение, доставляющее минимум функционалу среднеквадратической ошибки [4]:

$$\Delta(\alpha) = M_\eta \left[\left\| \hat{k}_\alpha - \bar{k}^+ \right\|^2 \right],$$

где \bar{k}^+ – псевдорешение системы уравнений (3) с точной правой частью; $M_\eta[\cdot]$ – оператор математического ожидания по ансамблю шума измерения правой части уравнения; $\|\cdot\|$ – евклидова норма вектора.

На практике вычисление точного значения α_{opt} невозможно из-за незнания функции $k(\tau)$. Поэтому используются разные алгоритмы выбора параметра регуляризации, позволяющие в той или иной степени оценить при различной априорной информации о числовых характеристиках шума правой части (см. [16–23]). В работе [15] для оценивания α_{opt} в случае точного входного сигнала был предложен критерий оптимальности линейного регуляризирующего алгоритма, который в дальнейшем являлся теоретической основой для построения алгоритмов оценивания α_{opt} при решении конкретных задач. В нашем случае попытаемся также применить этот алгоритм для оценивания α_{opt} , считая при этом, что уровень шума измерения входного сигнала меньше уровня шума выходного сигнала и этот шум не будет учитываться при вычислении параметра регуляризации. Приведем только основные соотношения, необходимые для понимания этого критерия и его использования в дальнейших исследованиях.

Введем статистику

$$\rho_W(\alpha) = \frac{1}{\sigma_\eta^2} \langle \tilde{f}, e_\alpha \rangle, \quad (10)$$

где $e_\alpha = \tilde{f} - \tilde{\Phi}k_\alpha$ – вектор невязки; $\tilde{\Phi}$ – матрица системы уравнений (3); k_α – вектор, составленный из значений регуляризованного решения $k_\alpha(\tau_j)$, $j = 0, \dots, N_k - 1$; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – скалярное произведение векторов. Тогда в качестве оценки для α_{opt} можно принять величину α_W , для которой выполняется неравенство

$$\mathfrak{S}_m(\beta/2) \leq \rho_W(\alpha_W) \leq \mathfrak{S}_m(1-\beta/2),$$

где $\mathfrak{S}_m(\beta/2)$ и $\mathfrak{S}_m(1-\beta/2)$ – квантиль χ^2 -распределения с $m = N_f$ степенями свободы уровней $\beta/2$ и $1-\beta/2$; β – вероятность ошибки первого ро-

да (обычно 0.05) при проверке статистической гипотезы об оптимальности значения α_W .

Для эффективного вычисления значения α_W , удовлетворяющего вышеприведенному неравенству, вводится величина $\gamma = 1/\alpha$ и функция $R_W(\gamma) = \rho_W(1/\gamma)$. Тогда $\alpha_W = 1/\gamma_W$, где γ_W – решение нелинейного уравнения

$$R_W(\gamma) = m, \quad (11)$$

удовлетворяющее условию

$$\mathfrak{S}_m(\beta/2) \leq R_W(\gamma_W) \leq \mathfrak{S}_m(1-\beta/2). \quad (12)$$

В работе [15] для решения нелинейного уравнения (11) применяется итерационная процедура Ньютона, в которой для вычисления $R_W(\gamma)$, $R'_W(\gamma)$, используются коэффициенты, описываемые следующими выражениями:

$$R_W(\gamma) = \frac{N}{\sigma_\eta^2} \sum_{l=0}^{N-1} \frac{Q_p(l)}{\gamma |\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + Q_p(l)} |\tilde{F}_p(l)|^2;$$

$$R'_W(\gamma) = -\frac{N}{\sigma_\eta^2} \sum_{l=0}^{N-1} \frac{Q_p(l) |\Phi_p(l)|^2}{[\gamma |\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + Q_p(l)]^2} |\tilde{F}_p(l)|^2.$$

Видно, что эти соотношения требуют только порядка N вычислительных операций, что обеспечивает высокую вычислительную эффективность вычисления значения α_W .

В работе [15] было показано, что для случая точно заданного входного сигнала величина α_W является наилучшей оценкой для α_{opt} по сравнению с другими известными алгоритмами выбора параметра регуляризации (принцип невязки [5, 21], метод перекрестной значимости [6, 18, 20], метод L -кривой [15, 22, 23]). Поэтому целесообразно выполнить исследование двухступенчатого алгоритма идентификации, когда в регуляризирующем алгоритме в качестве параметра регуляризации используется оценка α_W .

2. ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Для исследования свойств регуляризованных решений задачи идентификации (в том числе и решений, полученных с использованием предлагаемого двухступенчатого алгоритма идентификации) был выполнен многочисленный вычислительный эксперимент.

В качестве импульсной переходной функции идентифицируемой системы использовалась «колебательная» ИПФ, график которой приведен на рис. 2. Входной сигнал задавался двумя функциями: «узкополосной» – кри-

вая 1 на рис. 3 (обозначим ВХОД1) и «широкополосной» – кривая 2 на рис. 3 (обозначим ВХОД2). Такой выбор входных сигналов был обусловлен тем, что для широкополосного сигнала обусловленность системы (7) уменьшается и при прочих равных условиях ошибка оценивания ИПФ уменьшается. Количество отсчетов $k(\tau_j)$ $N_k=100$, количество отсчетов входного сигнала $\varphi(\tau_j)$ $N_\varphi=60$, $N_f = N_\varphi + N_k - 1 = 159$ и $N = 256$. Шаг дискретизации $\Delta_t = 0.022$. Точные значения входного и выходного сигналов искажались нормально распределенными случайными величинами с нулевыми средними и дисперсиями, определяемыми задаваемыми уровнями шумов. Относительные уровни шума правой части δ_f и шума измерения входного сигнала δ_φ определялись соотношениями $\delta_f = \frac{\|\tilde{f} - f\|}{\|f\|}$ и $\delta_\varphi = \frac{\|\tilde{\varphi} - \varphi\|}{\|\varphi\|}$, где f, φ – векторы размерности N_f, N_φ , составленные из точных значений $f(t_i)$ и $\varphi(\tau_j)$ соответственно; $\|\cdot\|$ – евклидова норма вектора. Ошибка вейвлет-фильтрации входного сигнала определялась относительной ошибкой $\delta_{\hat{\varphi}} = \frac{\|\hat{\varphi}_{\lambda_W} - \varphi\|}{\|\varphi\|}$, ошибка фильтрации выходного сигнала $\delta_{\hat{f}} = \frac{\|\hat{f}_{\lambda_W} - f\|}{\|f\|}$. Точность построенного регуляризованного решения определялась относительной ошибкой идентификации $\delta_{\hat{k}}(\alpha) = \frac{\|\hat{k}_\alpha - k\|}{\|k\|}$, где k – вектор, составленный из «точных» значений искомой ИПФ.

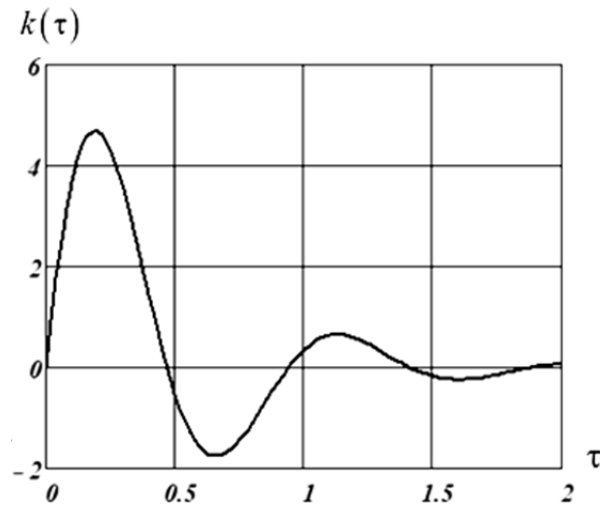


Рис. 2. Импульсная переходная функция $k(\tau)$

Fig. 2. Pulsed transient function $k(\tau)$

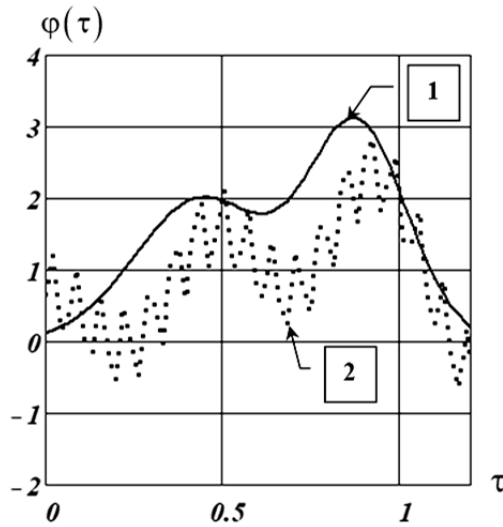


Рис. 3. Входные сигнала системы

Fig. 3. System input signals

Первая серия вычислительных экспериментов была посвящена исследованию влияния уровней шумов измерений входного и выходного сигнала на точность идентификации ИПФ с применением изложенного ранее регуляризирующего алгоритм (8). В табл. 1 представлены средние значения $\bar{\delta}_{k_{\min}}$ (объем выборки был равен 150) минимальной относительной ошибки идентификации $\delta_{k_{\min}} = \delta_{\hat{k}}(\alpha_{\text{opt}})$, вычисленной при разных значениях δ_{φ} (первый столбец таблицы) и δ_f (первая строка таблицы). На вход системы подавался сигнал ВХОД1.

Таблица 1

Table 1

$\delta_{\varphi} \backslash \delta_f$	0.00	0.02	0.05	0.075	0.10	0.15
0.00	10^{-5}	0.08	0.097	0.108	0.122	0.141
0.02	0.049	0.082	0.098	0.109	0.122	0.141
0.05	0.066	0.087	0.101	0.112	0.124	0.143
0.075	0.076	0.092	0.106	0.114	0.127	0.145
0.10	0.082	0.098	0.109	0.120	0.131	0.150
0.15	0.098	0.109	0.120	0.129	0.139	0.159

Анализ данных этой таблицы позволяет сделать весьма важный вывод о том, что шум измерения входного сигнала в меньшей степени влияет на ошибку идентификации, чем шум измерения выходного сигнала идентифи-

цируемой системы. Для количественной оценки такого влияния были вычислены две последовательности первых конечных разностей.

$$1. \text{ Последовательность } \left\{ \Delta_f^{(i)} = \frac{\bar{\delta}_{k_{\min}}^{(i+1)} - \bar{\delta}_{k_{\min}}^{(i)}}{\delta_f^{(i+1)} - \delta_f^{(i)}} \right\}, \quad i=1, \dots, 5, \text{ где } \bar{\delta}_{k_{\min}}^{(i)} -$$

среднее значение относительной ошибки идентификации при уровне шума выходного сигнала $\delta_f^{(i)}$, равном значению i -го элемента последовательности $\{0.0, 0.02, 0.05, 0.075, 0.10, 0.15\}$, и при заданном уровне шума входного сигнала. Очевидно, что $\Delta_f^{(i)}$ – это приближенное значение частной производной от относительной ошибки идентификации по относительному уровню шума выходного сигнала при значении $\delta_f^{(i)}$. Поэтому $\Delta_f^{(i)}$ можно трактовать как коэффициент чувствительности относительной ошибки идентификации к уровню шума выходного сигнала.

$$2. \text{ Последовательность } \left\{ \Delta_\varphi^{(i)} = \frac{\bar{\delta}_{k_{\min}}^{(i+1)} - \bar{\delta}_{k_{\min}}^{(i)}}{\delta_\varphi^{(i+1)} - \delta_\varphi^{(i)}} \right\}, \quad i=1, \dots, 5, \text{ где } \bar{\delta}_{k_{\min}}^{(i)} -$$

среднее значение относительной ошибки идентификации при уровне шума входного сигнала $\delta_\varphi^{(i)}$, равном значению i -го элемента последовательности $\{0.0, 0.02, 0.05, 0.075, 0.10, 0.15\}$, и фиксированном уровне шума выходного сигнала. По аналогии $\Delta_\varphi^{(i)}$ можно рассматривать как приближенное значение частной производной от относительной ошибки идентификации по относительному уровню шума входного сигнала при значении $\delta_\varphi^{(i)}$, а также $\Delta_\varphi^{(i)}$ можно трактовать как коэффициент чувствительности относительной ошибки идентификации к уровню шума входного сигнала.

На рис. 4 приведены графики следующих величин: кривая 1 – значения $\Delta_f^{(i)}$ при $\delta_\varphi^{(i)} = 0.02$; кривая 2 – значения $\Delta_\varphi^{(i)}$ при $\delta_f^{(i)} = 0.02$.

Видно, что коэффициент чувствительности к шуму выходного сигнала в несколько раз (иногда и на порядок) выше по сравнению с коэффициентом чувствительности к шуму измерения входного сигнала.

Аналогичные вычислительные эксперименты были проведены и в случае высокочастотного входного сигнала (ВХОД2). Результаты обработки результатов этих экспериментов позволяют сделать выводы, аналогичные выводам для ВХОД1.

Таким образом, из результатов выполненных исследований следует вывод о необходимости в первую очередь осуществить фильтрацию выходного сигнала идентифицируемой системы.

Поэтому **вторая серия вычислительных экспериментов** была посвящена исследованию влияния вейвлет-фильтрации выходного сигнала на точность идентификации ИПФ. В этих экспериментах менялся уровень шума выходного сигнала, выполнялась его вейвлет-фильтрация с использованием пороговой функции (4) и пороговой величины λ_W . Отфильтрованный вы-

ходной сигнал использовался для построения регуляризованного решения с коэффициентами ДПФ (8) и параметром регуляризации α_W . В операторном форме такую схему идентификации можно представить выражением

$$\hat{k}_{\alpha,\lambda}^{(f)} = F^{-1} \left\{ R_{\alpha_W} \left[F(\tilde{\varphi}), F(\hat{f}_{\lambda_W}) \right] \right\}. \quad (13)$$

Верхний индекс в обозначении $\hat{k}_{\alpha,\lambda}^{(f)}$ определяет сигнал, который подвергся вейвлет-фильтрации.

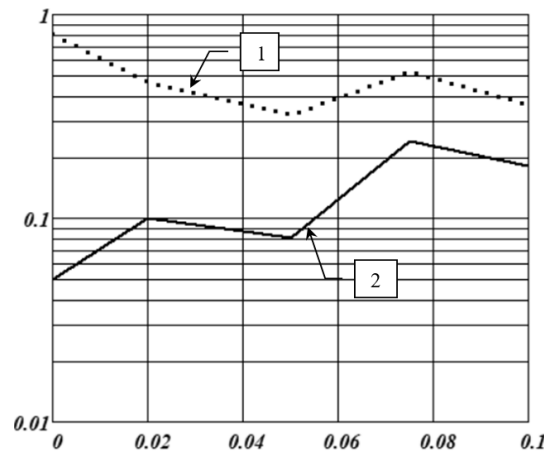


Рис. 4. Значения элементов последовательностей $\Delta_{\varphi}^{(i)}, \Delta_f^{(i)}$

Fig. 4. The values of the sequence elements $\Delta_{\varphi}^{(i)}, \Delta_f^{(i)}$

Общий результат этих экспериментов: уровень шума выходного сигнала уменьшался в 2-3 раза, но относительная ошибка идентификации была такой же, а в ряде экспериментов была больше относительной ошибки регуляризованного решения (9) без предварительной вейвлет-фильтрации выходного сигнала. Объяснение этому факту следующее. После вейвлет-фильтрации отфильтрованный сигнал \hat{f}_{λ_W} можно представить как сумму векторов $\hat{f}_{\lambda_W} = f + \eta_{\lambda}$, где η_{λ} – «остаточный шум» вейвлет-фильтрации. Если значения η_i исходного шума не коррелированы друг с другом (дискретный «белый» шум), то значения остаточного шума $(\eta_{\lambda})_i$ будут представлять собой дискретный «цветной» шум с сильной корреляцией между соседними значениями. На рис. 5 приведены значения выборочных автокорреляционных функций: $R_{\eta}(l) = M(\eta_i \cdot \eta_{i+l})$ (квадратные маркеры), $R_{\eta_{\lambda}}(l) = M((\eta_{\lambda})_i \cdot (\eta_{\lambda})_{i+l})$ (треугольные маркеры). Видно наличие существенной корреляции между значениями остаточного шума вейвлет-фильтрации.

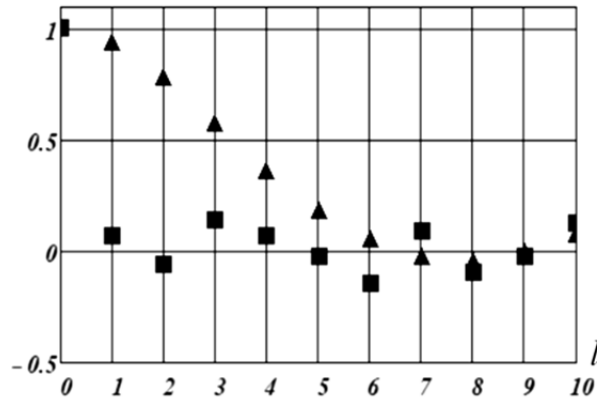


Рис. 5. Автокорреляционные функции шумов

Fig. 5. Autocorrelation noise functions

Следовательно, можно сделать важный (для методов решения уравнений с разностным ядром) вывод, что ошибка регуляризованного решения при «цветном» шуме измерения правой части уравнения (1) значительно выше (зависит от соотношения полос спектров шума и точной правой части), чем при «белом» шуме.

Таким образом, остается одна схема построения двухэтапного алгоритма идентификации.

Этап 1. Вейвлет-фильтрация входного сигнала идентифицируемой системы, т. е.

$$\hat{\phi}_\lambda = W^{-1} [T_{\lambda W} (W\tilde{\phi})].$$

Этап 2. Построение регуляризованного решения, когда в качестве входного сигнала берется результат вейвлет-фильтрации на первом этапе.

В операторной форме эта схема идентификации отображается как

$$\hat{k}_{\alpha, \lambda}^{(\phi)} = F^{-1} \left\{ R_{\alpha W} \left[F(\hat{\phi}_{\lambda W}), F(\tilde{f}) \right] \right\}. \quad (14)$$

Перейдем к исследованию точности этой схемы идентификации.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ДВУХЭТАПНОГО АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ

Для ответа на вопрос об эффективности предложенной схемы идентификации был выполнен вычислительный эксперимент, в котором строились три регуляризованных решения:

- решение \hat{k}_α , которое соответствует точному входному сигналу и зашумленному выходному сигналу с относительным уровнем шума измерения δ_f ;

- решение \hat{k}_α , которое соответствует зашумленным входному сигналу и выходному сигналу с относительными уровнями шумов δ_φ и δ_f соответственно и вычисляется по алгоритму (9);
- решение $\hat{k}_{\lambda,\alpha}^{(\varphi)}$, вычисляемое по алгоритму (14).

Для всех трех решений определялись средние значения относительных ошибок идентификации (объем выборки был равен 150) при разных относительных уровнях шумов измерений δ_φ , δ_f . Эти средние значения, вычисленные для ВХОД1, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Уровни шума			Относительные ошибки идентификации			Коэффициент K_{eff}
δ_φ	$\delta_{\hat{\varphi}}$	δ_f	\hat{k}_α	\hat{k}_α	$\hat{k}_{\lambda,\alpha}^{(\varphi)}$	
0.02	0.013	0.02	0.078	0.083	0,077	1.072
		0.05	0.097	0.099	0,095	1.041
		0.10	0.115	0.119	0,115	1.032
0.05	0.025	0.02	0.078	0.093	0,080	1.161
		0.05	0.097	0.104	0,100	1.042
		0.10	0.115	0.122	0,118	1.032
0.075	0.034	0.02	0.078	0.103	0,084	1.204
		0.05	0.097	0.111	0,103	1.074
		0.10	0.115	0.128	0,123	1.044
0.10	0.042	0.02	0.078	0.106	0,086	1.236
		0.05	0.097	0.119	0,109	1.096
		0.10	0.115	0.133	0,127	1.049
0.15	0.067	0.02	0.078	0.131	0,101	1.302
		0.05	0.097	0.134	0,116	1.158
		0.10	0.115	0.148	0,138	1.071

В втором столбце таблицы приводятся средние значения относительной ошибки $\delta_{\hat{\varphi}} = \frac{\|\hat{\varphi}_{\lambda,W} - \varphi\|}{\|\varphi\|}$, что позволяет оценить эффективность вейвлет-

фильтрации зашумленного входного сигнала. В последнем столбце находятся средние значения коэффициента эффективности двухэтапного алгоритма

идентификации $K_{eff} = \frac{\|\hat{k}_\alpha - k\|}{\|\hat{k}_{\lambda,\alpha}^{(\varphi)} - k\|}$, который показывает, во сколько раз

уменьшается относительная ошибка двухэтапного алгоритма идентификации

по сравнению с относительной ошибкой «традиционного» регуляризованного решения (9).

Заметим, что для входного сигнала ВХОД2 (высокочастотный сигнал) результаты были аналогичными, но значения коэффициента эффективности были на 10...15 % ниже по сравнению с коэффициентами эффективности для сигнала ВХОД1.

Анализ результатов этой серии вычислительного эксперимента позволяет сделать следующие выводы.

Вейвлет-фильтрация входного сигнала существенно (более чем в два раза) уменьшает относительный уровень шума измерения этого сигнала, что позволяет в значительной степени устранить влияние шума измерения входного сигнала на ошибку регуляризованного решения.

Если уровень шума входного сигнала соизмерим или меньше уровня шума измерения выходного сигнала, то выигрыш от применения предложенного двухэтапного алгоритма идентификации (14) невелик (порядка несколько процентов).

Если уровень шума входного сигнала значительно больше уровня шума измерения выходного сигнала, то выигрыш от применения предложенного двухэтапного алгоритма идентификации становится существенным и может достигать 25...30 % по сравнению с регуляризованным решением, построенным без предварительной фильтрации входного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный двухэтапный алгоритм непараметрической идентификации (14) целесообразно использовать при уровне шума измерения входного сигнала идентифицируемой системы, который в несколько раз превосходит уровень шума выходного сигнала. Это требует знаний соответствующих уровней шумов измерений. Так как на практике относительный уровень шума измерения часто бывает неизвестным, то для его оценивается можно обратиться к простой оценке (основанной на дискретном преобразовании Фурье), предложенной в работе [24] и позволяющей с высокой точностью (порядка 4...6 %) определить эту числовую характеристику шума измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Greblicki W., Pawiak M.* Nonparametric system identification. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 400 p.
2. *Кондрашин А.В., Хорьков В.И.* Исследование и идентификация управляемых технических систем. – М.: ИспоСервис, 2000. – 220 с.
3. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 285 с.
4. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. – М.: Наука, 1990. – 231 с.
5. *Морозов В.А., Гребенников А.И.* Методы решения некорректно поставленных задач: алгоритмический аспект. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 319 с.
6. *Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И.* Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. – Новосибирск: Наука, 1984. – 238 с.
7. *Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А.* Непараметрическая идентификация динамической системы при неточном входном сигнале // Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 4 (22). – С. 86–92.

8. Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Локальный регуляризирующий алгоритм непараметрической идентификации объекта с неточным входным сигналом // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 19–38. – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-19-38.
9. Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Алгоритм идентификация импульсной переходной функции при высоком уровне шума измерения входного сигнала системы // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 2 (24). – С. 67–73.
10. Mallat S. Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$ // Transactions of the American Mathematical Society. – 1989. – Vol. 315, N 1. – P. 69–87.
11. Mallat S. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1989. – Vol. 11, N 7. – P. 674–693.
12. Воскобойников Ю.Е. Вейвлет-фильтрация сигналов и изображений (с примерами в MathCAD): монография. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2015. – 188 с.
13. Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Выбор наилучшей однопараметрической пороговой функции в алгоритмах вейвлет-фильтрации // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 3 (85). – С. 71–82.
14. Vidakovic B. Statistical modeling by wavelets. – New York: John Wiley & Sons, 1999. – 382 p. – (Wiley series in probability and statistics).
15. Воскобойников Ю.Е. Устойчивые алгоритмы решения обратных измерительных задач: научная монография. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2007. – 184 с.
16. Information complexity-based regularizing parameter selection for solution of ill conditioned inverse problems / A.M. Urmanov, A.V. Gribok, H. Bozdogan, J.W. Hines, R.E. Uhrig // Inverse Problems. – 2002. – Vol. 18, N 2. – P. L1–L9.
17. Vogel C.R. Non-convergence of L-curve regularization parameter selection method // Inverse Problems. – 1996. – Vol. 12, N 4. – P. 535–547.
18. Lukas M.A. Comparison of parameter choice methods for regularization with discrete noisy data // Inverse Problems. – 2000. – Vol. 14, N 2. – P. 161–184.
19. Engl H.W., Hanke M., Neubauer F. A regularization of inverse problems. – Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publisher, 2000. – 383 p.
20. Титаренко В.Н., Ягола А.Г. Применение метода GVC для корректных и некорректных задач // Вестник МГУ. Серия 3, Физика, астрономия. – 2000. – № 4. – С. 15–18.
21. Морозов В.А. Регулярные методы решения некорректно поставленных задач. – М.: Наука, 1987. – 240 с.
22. Левин М.А., Татаринцев А.В., Ахкубеков А.Э. Метод Laplace-DLTS с выбором параметра регуляризации по L-кривой // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 5. – С. 74–81.
23. Димаки А.В., Светлаков А.А. Регуляризация решения задачи идентификации при использовании алгоритма чувствительности // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 5. – С. 27–31.
24. Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Оценка характеристик шума измерения в модели «сигнал+шум» // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 3 (25). – С. 54–61.

Воскобойников Юрий Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный работник Высшей школы РФ, Соросовский профессор, действительный член МАИ, РАН, МАН ВШ, профессор кафедры автоматки НГТУ, заведующий кафедрой прикладной математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (СИБСТРИН). Автор более 290 публикаций, шести монографий, посвященных решению некорректных задач интерпретации данных и обработке сигналов и изображений, и большого числа учебных пособий. E-mail: voscob@mail.ru

Крысов Данила Алексеевич, аспирант кафедры автоматки факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Автор восьми публикаций по фильтрации зашумленных сигналов и идентификации динамических систем. E-mail: Tomahawk.RUS@gmail.com

Voskoboinikov Yuri Evgenievich, D. Sc. (Phys.& Math.), professor, an Honored Worker of RF Higher School A Soros Professor, a full member of MAI, RAN, HS MAN; professor at the NSTU department of automation; head of the department of applied mathematics in Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN). He is the author of

more than 290 publications, 6 monographs dealing with solution of incorrect problems of data interpretation and signal and image processing as well as a great number of teaching manuals. E-mail: voscob@mail.ru

Krysov Danila Alexeevich, a postgraduate student at the Novosibirsk State Technical University department of automation. He has published 8 research papers on filtration of noisy signals and dynamic system identification. E-mail: Tomahawk.RUS@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-21-40

A two-step robust algorithm of nonparametric identification for a system with a high-noise input signal*

Yu.E. VOSKOBOINIKOV^{1,2,a}, D.A. KRYSOV^{1,b}

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation*

^a voscob@mail.ru ^b Tomahawk.RUS@gmail.com

Abstract

The Voltaire integral equation of the first kind with a difference kernel is often used as a model of a stationary dynamical system. For such models the problem of non-parametric identification consists in estimating a difference kernel (called the Impulse Response Function) from the measured values of the input and output signals of the identified dynamic system. This task is ill-posed, i.e. the solution may not exist, may not be unique, and may be unstable with respect to errors (measurement noise) of the original data. To obtain a unique and stable (but approximate) solution, various regularization methods in particular the A.N. Tikhonov regularization method are used. The discrete Fourier transform (DFT) forms a computational basis of such an algorithm. It is assumed that an input signal (the core of the integral equation) is specified accurately, and an output signal of the system is recorded with some random error. However, this assumption is seldom implemented in practice, since both the input and output signals of the system are measured and recorded by measuring devices and thus are set with random errors (measurement noise). In this paper, a two-step stable algorithm for nonparametric identification of the Impulse Response Function of a stationary dynamic system is proposed. The algorithm is used in the case when both the input and output signals of the identified system are recorded with random errors. At the first stage, wavelet filtering of the noisy input signal is used. For this, threshold algorithms for processing the coefficients of the wavelet decomposition of a noisy signal are used. Threshold values based on the statistical optimality criterion of the filtering algorithm are calculated to minimize the filtering error. At the second stage, a regularizing algorithm using a discrete Fourier transform is applied to the filtered input signal. To select the optimal value of a regularization parameter a special algorithm is used. The paper analyses the degree of influence of the error levels of the input and output signals on the identification error. The results of the computational experiment are published and discussed. The effectiveness of the proposed approach to the construction of a stable algorithm for non-parametric identification of the Impulse Response Function of a stationary dynamic system with different levels of measurement noise of input and output signals are illustrated.

Keywords: nonparametric identification, ill-posed problems, Voltaire Integral Equation of the First Kind, threshold wavelet filtering algorithms, estimation of optimal thresholds, a regularizing algorithm, estimation of the optimal regularization parameter, dependence of identification error on measurement noise

* *Received 20 August 2018.*

REFERENCES

1. Greblicki W., Pawiak M. *Nonparametric system identification*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 400 p.
2. Kondrashin A.V., Khor'kov V.I. *Issledovanie i identifikatsiya upravlyaemykh tekhnicheskikh sistem* [Research and identification of controllable technical systems]. Moscow, IspoServis Publ., 2000. 220 p.
3. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 285 p.
4. Tikhonov A.N., Goncharkii A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. *Chislennyye metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Numerical methods for the solution of ill-posed problems]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 231 p.
5. Morozov V.A., Grebennikov A.I. *Metody resheniya nekorrektno postavlennykh zadach: algoritmicheskii aspekt* [Methods for solving ill-posed problems: an algorithmic aspect]. Moscow, Moscow State University Publ., 1992. 319 p.
6. Voskoboinikov Yu.E., Preobrazhenskii N.G., Sedel'nikov A.I. *Matematicheskaya obrabotka eksperimenta v molekulyarnoi gazodinamike* [Mathematical processing of the experiment in molecular gas dynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 238 p.
7. Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. Neparаметрическая идентификация динамической системы при неточном входном сигнале [Nonparametric identification of a dynamic system with an inaccurate input signal]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya – Automatics & Software Engineering*, 2017, no. 4 (22), pp. 86–92.
8. Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. Lokal'nyi regulyaziruyushchii algoritm neparаметрической идентификации объекта с неточным входным сигналом [Local regularizing algorithm of nonparametric identification to object with inaccurate input signal]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 19–38. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-19-38.
9. Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. Algoritм идентификации импульсной переходной функции при высоком уровне шума измерения входного сигнала системы [The algorithm for identifying the impulse response function at a high noise level of measuring the input signal of the system]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya – Automatics & Software Engineering*, 2018, no. 2 (24), pp. 67–73.
10. Mallat S. Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$. *Transactions of the American Mathematical Society*, 1989, vol. 315, no. 1, pp. 69–87.
11. Mallat S. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, vol. 11, no. 7, pp. 674–693.
12. Voskoboinikov Yu.E. *Veivlet-fil'tratsiya signalov i izobrazhenii (s primerami v MathCAD)* [Wavelet filtering of signals and images: (with examples in MathCAD)]. Novosibirsk, NGASU Publ., 2015. 188 p.
13. Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. Vybór nailuchshei odnoparametricheskoi porogovoi funktsii v algoritmakh veivlet-fil'tratsii [Choose of the best one-parameter threshold function to the wavelet filtering algorithms]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (85), pp. 71–82.
14. Vidakovic B. *Statistical modeling by wavelets. Wiley series in probability and statistics*. New York, John Wiley & Sons, 1999. 365 p.
15. Voskoboinikov Yu.E. *Ustoichivyye algoritmy resheniya obratnykh izmeritel'nykh zadach* [A stable algorithms for solving inverse measurement problems]. Novosibirsk, NGASU Publ., 2007. 184 p.
16. Urmanov A.M., Gribok A.V., Bozdogan H., Hines J.W., Uhrid R.E. Information complexity-based regularizing parameter selection for solution of ill conditioned inverse problems. *Inverse Problems*, 2002, vol. 18, no. 2, pp. L1–L9.
17. Vogel C.R. Non-convergence of L-curve regularization parameter selection method. *Inverse Problems*, 1996, vol. 12, no. 4, pp. 535–547.
18. Lukas M.A. Comparison of parameter choice methods for regularization with discrete noisy data. *Inverse Problems*, 2000, vol. 14, no. 2, pp. 161–184.
19. Engl H.W., Hanke M., Neubauer F. *A regularization of inverse problems*. Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publisher, 2000. 383 p.
20. Titarenko V.N., Yagola A.G. Primenenie metoda GVC dlya korrektnykh i nekorrektnykh zadach [Applying the GVC method for correctly posed and ill-posed problems]. *Vestnik Moskovskogo*

Universiteta. Seriya 3, Fizika. Astronomiya – Moscow University Physics Bulletin, 2000, no. 4, pp. 15–18. (In Russian).

21. Morozov V.A. *Regulyarnye metody resheniya nekorrektno postavlennykh zadach* [Regular methods for solving ill-posed problems]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 240 p.

22. Levin M.A., Tatarintsev A.V., Akhkubekov A.E. Metod Laplace-DLTS s vyborom parametra regularizatsii po L-krivoi [Laplace-DLTS method with the choice of the regularization parameter on the L-curve]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 5, pp. 74–81. (In Russian).

23. Dimaki A.V., Svetlakov A.A. Regularizatsiya resheniya zadachi identifikatsii pri ispol'zovanii algoritma chuvstvitel'nosti [Regularization of the solution to the problem of identification using the sensitivity algorithm]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 5, pp. 27–31.

24. Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. Otsenivanie kharakteristik shuma izmereniya v modeli "signal+shum" [Estimation of the Noise Measurement Characteristics in the Model "Signal + Noise"]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya – Automatics & Software Enginery*, 2018, no. 3 (25), pp. 54–61.

Для цитирования:

Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Двухэтапный устойчивый алгоритм непараметрической идентификации системы с высоким уровнем шума входного сигнала // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 21–40. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-21-40.

For citation:

Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. Dvukhetapnyi ustoichivyi algoritm neparametricheskoi identifikatsii sistemy s vysokim уровнем шума vkhodnogo signala [Two-step robust algorithm of nonparametric identification for a system with a high-noise input signal]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 21–40. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-21-40.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.82

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-41-60

Разработка предикатной модели выбора лексических значений при переводе на русский жестовый язык на основе семантического словаря В.А. Тузова и системы автоматической обработки текста «Диалинг»*

И.А. КАГИРОВ^{1,a}, Ю.С. МАНУЕВА^{2,b}

¹ 199178, РФ, Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

^a kagirov@iias.spb.su ^b manueva.js@gmail.com

Рассмотрены существующие системы семантического анализа русского языка: многоцелевой лингвистический процессор «ЭТАП-3», технология ABBYY Comreno, технология Texterra, статистические и нейросетевые подходы в «Яндекс Переводчике» и «Google Переводчике». На основе анализа преимуществ и недостатков рассмотренных систем сделан вывод о необходимости разработки системы семантического анализа для повышения качества перевода и внедрения в систему перевода со звучащего русского языка на русский жестовый язык «Сурдофон». Целью данной статьи является описание разработанной предикатной модели семантического анализа системы компьютерного сурдоперевода русского языка на основе семантического словаря В.А. Тузова. Для определения корректного значения многозначного слова и омонима в предложении применяются система «Диалинг», словарь В.А. Тузова и список жестов русского жестового языка. Рассмотрена модель выбора значения многозначного слова и омонима, основанная на логике предикатов первого порядка. При выполнении семантического анализа предложения значение trueMeaning слова word считается корректным, если предикат P (word, trueMeaning) имеет значение «истина». Для повышения качества перевода и разрешения ситуаций, в которых отсутствует возможность однозначного определения значения многозначного слова, предложен статистический алгоритм на базе корпуса русского языка. Определен критерий оценки корректности найденного значения многозначного слова. Проведен сравнительный анализ разработанного модуля семантического анализа с существующими системами «Яндекс Переводчик» и «Google Переводчик». Сделан вывод, что разработанная система семантического анализа проводит более точный перевод при наличии лексической неоднозначности. Разработанная предикатная модель с учетом статистического алгоритма позволяет в сравнении с семантическим словарем В.А. Тузова решить проблему выбора лексического значения в случае, когда истинны условия для двух и более альтернативных значений.

* Статья получена 05 сентября 2018 г.

В данной ситуации определяется лучшее сочетание лексических значений по критерию близости к корпусу русского языка.

Ключевые слова: русский жестовый язык, компьютерный сурдоперевод, семантический анализ, предикатная модель, омонимы, статистический анализ

ВВЕДЕНИЕ

Лица с ограниченными возможностями здоровья являются одной из наиболее социально уязвимых групп населения. По данным Министерства здравоохранения Российской Федерации, количество людей с ограниченными возможностями здоровья по слуху составляет порядка 13 миллионов человек. В качестве помощи данной категории граждан государством предусмотрено предоставление услуг сурдопереводчика в размере 40 часов в год. Приведенные меры не решают в полном объеме проблему коммуникации людей с дефектами слуха с обществом и государственной властью, так как предоставляемого объема услуг переводчиков недостаточно. В связи с этим возникает необходимость в использовании мультимедийных компьютерных систем, которые будут переводить звучащую русскую речь на русский жестовый язык и обратно. Большинство реализованных компьютерных сурдопереводчиков предназначено для перевода с английского языка на английский жестовый язык. Примерами таких систем являются: система перевода Zardoz, система машинного перевода TEAM, проект ViSiCAST [1–3]. Стратегия перевода в данных системах основана на морфологическом и синтаксическом анализе. Только в системе Zardoz дополнительно учитывается семантическая информация. Для осуществления корректного перевода недостаточно морфологической и синтаксической информации, необходимо проводить семантический анализ предложения. Данные работы не могут быть в чистом виде применены для русского языка и русского жестового языка, так как рассчитаны только на американский жестовый язык [20–22].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последние годы в России проблеме коммуникации людей с ограниченными возможностями по слуху стали уделять больше внимания. Применительно к определению лексических значений для перевода на жестовый язык можно привести работы М.Г. Грифа [20–23]. Существенный вклад в разработку компьютерного сурдопереводчика внесен компанией «Сурдофон», число используемых жестов русского жестового языка в котором составляет около 3500, но данная разработка не учитывает семантическую составляющую. Работа В.А. Тузова «Компьютерная семантика русского языка» посвящена описанию семантики только русского звучащего языка и представляет собой семантический словарь, содержащий 163 901 словарную статью [19]. В работе ученого не рассматривается применимость к русскому жестовому языку. На основе соответствия лексических значений слов русского языка жестам русского жестового языка А.Л. Воскресенским разработан словарь RuSLED, включающий 2372 слова и 2537 видеоизображений жестов. В данном словаре не осуществляется перевод предложений, а рассматриваются отдельные слова [24].

В настоящее время существуют различные системы перевода со звучащего языка на язык жестов [1–3]. Существующие системы компьютерного сурдоперевода (система Zardoz, система TEAM, система ViSiCAST, система «Сурдофон») обладают основным недостатком – отсутствием учета семантической составляющей звучащего языка и жестового языка. Для осуществления качественного перевода необходимо учитывать специфику двух языков. Рассмотрены возможные подходы для решения данной проблемы: многоцелевой лингвистический процессор «ЭТАП-3», который содержит около 100 000 лексических единиц, технология АВВУ Compreno, технология Texterra, статистические и нейросетевые подходы в «Яндекс Переводчике», в котором количество поддерживаемых языков составляет 95, и «Google Переводчике», работающем со 105 языками. На основе анализа преимуществ и недостатков данных систем сделан вывод о необходимости разработки системы семантического анализа для повышения качества перевода и внедрения разработанной системы в программу «Сурдофон».

Исходными данными является предложение на русском языке, которое получено после этапа распознавания речи. Повышение качества перевода достигнуто путем внедрения в систему «Сурдофон» модуля семантического анализа.

Целью данной статьи является описание разработанной предикатной модели семантического анализа системы компьютерного сурдоперевода русского языка на основе словаря семантических отношений В.А. Тузова, а также статистического алгоритма, определяющего лексическое значение слова в случае, когда истинны условия для двух и более альтернативных значений.

2. ОБЗОР СИСТЕМ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РУССКОГО ЯЗЫКА

Основным недостатком существующих систем компьютерного сурдоперевода является отсутствие учета семантической составляющей звучащего и жестового языков. Для осуществления качественного перевода необходимо учитывать специфику двух языков. Рассмотрим возможные подходы для решения данной проблемы: многоцелевой лингвистический процессор «ЭТАП-3», технологию АВВУ Compreno, технологию Texterra, статистические и нейросетевые подходы в Яндекс и Google переводчиках.

Концепция многоцелевого лингвистического процессора «ЭТАП-3» принадлежит И.А. Мельчуку, который частично разработал правила и словари для анализа и синтеза текстов [25]. Научными сотрудниками Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича разработано программное обеспечение «ЭТАП-3», представляющее модель «Смысл-Текст» [4, 25]. Цель программы – анализ и синтез текстов для определения его смысла. Лексические функции решают задачи разрешения синтаксической омонимии и лексической неоднозначности, идиоматического перевода. Пример синтаксической омонимии представлен в примере «контроль правительства»: первый случай – правительство контролирует кого-то, второй – правительство контролируется. Процесс разрешения синтаксической омонимии заключается в определении роли слова «контроль» (осу-

ществлять или быть под, находиться под, подвергаться). Система «ЭТАП-3» способна также решить проблему лексической неоднозначности. Корректное значение определяется в случае, когда глагол употреблен в контексте существительного (например, держать слово, держать пари, держать зачет) [4].

Рассмотрим другую технологию анализа текстов на естественном языке ABVYU Comprero [5]. В отличие от систем, основанных на статистике и правилах, ABVYU Comprero выполняет полный семантико-синтаксический анализ текста, создает его универсальное представление, извлекает сущности, события и связи между ними. Рассмотрим этапы работы ABVYU Comprero (рис. 1) [5].

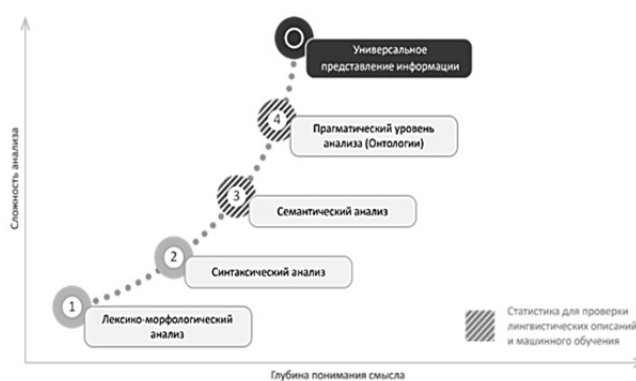


Рис. 1. Этапы работы ABVYU Comprero

Fig. 1. Stages of ABVYUComprero work

Работа ABVYU Comprero начинается с этапа лексико-морфологического анализа. На первом этапе исходный текст разбивается на абзацы, предложения и слова. Затем программа определяет части речи и морфологические признаки слов, такие как род, число, падеж. На втором этапе проводится полный синтаксический анализ. Семантический анализ определяет значения каждого слова, далее разрабатывает семантическую структуру предложения на основе связей, которые были установлены на предыдущем этапе. Следующий этап заключается в прагматическом уровне анализа. На этом этапе накладывается прагматический слой анализа текста, применяются онтологии (терминология для конкретной предметной области анализа) и правила извлечения нужных объектов. Основным достоинством технологии ABVYU Comprero является определение смысла многозначных слов с помощью разрешения проблемы омонимии. К преимуществам данной технологии относятся точный анализ, быстрый запуск проекта и качественная работа с информацией на русском языке [5].

Рассмотрим подробнее технологию Texterra, которая представляет собой набор средств для автоматического построения онтологий, а также проведения семантического анализа предложений, разработанный в Институте системного программирования В.П. Иванникова [6]. В качестве решаемых задач с использованием данной технологии приводятся следующие: анализ отзывов, поиск документов и построение баз знаний. В основе технологии лежат два основных метода: методы получения данных и методы компьютер-

ной лингвистики. На первом этапе происходит разбиение текста на отдельные предложения, затем на отдельные слова. На втором этапе выполняются алгоритмы морфологического анализа, которые определяют морфологические характеристики и начальные формы слов. На третьем этапе проводится синтаксический анализ для определения связей между словами и выполняются алгоритмы, направленные на разрешение кореферентности. Также модуль содержит алгоритм исправления ошибок. В системе реализованы алгоритмы определения именованных сущностей, которые встречаются в текстах с указанием конкретных имен, и алгоритмы, осуществляющие поиск соответствий между понятиями и фрагментами текстов, определяющих семантику данных понятий [6].

Переводчик российской компании «Яндекс» представляет собой сервис, предназначенный для автоматического перевода слов, фраз, целых текстов. Работа сервиса основана на собственной разработке технологии машинного перевода. Количество поддерживаемых языков составляет 95 языков. Для данной статьи наибольший интерес представляет механизм перевода, а в частности, семантический анализ переводимых текстов. С 2011 года в «Яндекс Переводчике» работает система статистического перевода. В основе статистического подхода лежит загрузка словарей и грамматик различных языков, множество параллельных текстов, которые являются переводами друг друга. В 2017 году в компании «Яндекс» в дополнение к статистическому переводу внедрена нейронная сеть, которая, как и система статистического анализа, также обучается на текстах. Наилучший результат достигается при совместной работе этих двух подходов.

В статистическом подходе исходное предложение разделяется на отдельные слова и фразы. Затем проводится перебор всех вариантов и происходит оценка вероятности каждого из них. Оценка вероятности производится на основе того, сколько раз данный вариант встречался в загруженных текстах. Например, английское слово *spring* имеет два основных значения – «весна» и «пружина». В рассмотренном случае если рядом стоит слово *early*, то скорее всего имеется в виду значение «весна». Если в предложении стоит слово *metal*, то наиболее вероятен перевод слова *spring* как «пружина». Основное преимущество статистической модели – это возможность обрабатывать редкие и сложные слова, а также фразы. У данного подхода есть и существенный недостаток, который заключается в отсутствии построения качественной полной картины текста.

Нейросетевой подход также применим к таким видам информации, как речь и изображение. Для системы, основанной на нейронной сети, перевод текста является одной из возможных для решения с ее помощью задач. Обучение нейронной сети проводится на текстовых массивах, которые представляют собой текст оригинала и текст перевода. В процессе перевода нейросеть оперирует не словами и фразами, как при статистическом переводе, а целыми предложениями. В качестве входной информации в данном случае является предложение на одном языке, а выходная информация – это переведенное предложение. Нейросетевой подход успешно применяется даже в случае, если слова, которые передают смысл предложения, находятся в разных его частях. Пример перевода предложения с использованием статистического и нейросетевого подхода представлен на рис. 2.

Подход, основанный на нейронных сетях, имеет следующие недостатки. Если нейросеть не сможет перевести предложение, то результат перевода будет некорректным. Также для нейронной сети сложностью является перевод редких слов, таких как редкие имена, топонимы. В данной ситуации на помощь придет статистический перевод, если данное слово встречалось в его текстах. Таким образом, в системе перевода компании «Яндекс» используется гибридный подход на основе систем нейросетевого и статистического перевода. Введенный текст обрабатывается одновременно обеими системами, затем проводится оценка перевода. Гибридная система применяется только для перевода с английского на русский. На данный момент для остальных языков работает только статистическая модель [7, 8].

исходное предложение:	Can I have a banana?
статистический перевод:	Я могу есть банан?
нейросетевой перевод:	Можно банан?

Рис. 2. Пример перевода с использованием статистического и нейросетевого подхода

Fig. 2. Example of translation using the statistical and neural network approach

«Google Переводчик» – бесплатный многоязыковой сервис машинного перевода текстов, разработанный компанией Google. «Google Переводчик» поддерживает более чем 100 языков [9]. В конце 2016 года переводчики стали применять технологию нейронных сетей (Google Neural Machine Translation) [10]. В «Google Переводчике» используются два вида перевода: статистический перевод и перевод, основанный на нейронных сетях. С 2006 года основным методом перевода является статистический перевод, в основе алгоритмов которого лежат исследовательские работы Франца Оча [11, 12]. В исследованиях в качестве необходимых компонент для качественной работы статистического перевода для новой пары языков указаны параллельные тексты на двух внедряемых языках, насчитывающие более 150–200 миллионов слов, и отдельные тексты на каждом языке, размеры которых должны быть около миллиарда слов. Затем полученный языковой корпус используется алгоритмами статистического перевода. В системе Google отсутствует прямой перевод: сначала выполняется перевод на английский язык и затем на язык перевода [13]. В процессе перевода запускается алгоритм поиска в миллионах документов для улучшения качества перевода. В случае обнаружения документа, переведенного человеком-переводчиком, система Google выдвигает предположения в области лучшего перевода. С 2016 года в компании ведутся разработки в области перевода, основанного на нейронных сетях (Google Neural Machine Translation) [14]. В частности, используются сети с короткой памятью. Нейронная сеть улучшает качество перевода за счет использования метода перевода на основе примера, в котором система «учится на милли-

онах примеров». Затем полученный результат преобразуется для получения более естественного перевода с правильной грамматикой [15]. Первыми языками для тестирования работоспособности нейронной сети стали английский, французский, немецкий, португальский, испанский, турецкий, китайский, японский и корейский языки. В 2017 году были добавлены хинди, русский и вьетнамский языки. В сравнении со статистическим переводом нейронные сети переводят напрямую без использования языка-посредника. Основным недостатком системы является зависимость качества перевода от используемых языков.

3. СИСТЕМА СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПЕРЕВОДА НА РУССКИЙ ЖЕСТОВЫЙ ЯЗЫК

На рис. 3 представлена схема работы разработанной системы семантического анализа.



Рис. 3. Схема выбора значения многозначного слова и омонима

Fig. 3. Scheme for choosing the meaning of a multi-valued word and a homonym

Для определения корректного значения многозначного слова и омонима в предложении применяется система «Диалинг» и используются словарь В.А. Тузова и список жестов русского жестового языка [16–18]. На первом этапе введенное предложение обрабатывается системой «Диалинг» [17]. В качестве выходной информации из данной системы будут являться начальные формы слов в предложении, морфологические и синтаксические характеристики, семантические отношения. На втором этапе был проанализирован семантический словарь В.А. Тузова, на основе которого спроектирована база данных. Словарь, разработанный В.А. Тузовым, представляет собой текстовый документ формата «.txt» [19]. Для работы со словарем необходимо разбить словарную статью на компоненты, с которыми в дальнейшем будет работать модуль семантического анализа. Большинство слов в словаре имеет более одного значения. На третьем этапе в базу данных был добавлен список жестов русского жестового языка [16]. Проведена работа по определению соответствия между жестами и значениями слов в словаре. На данном этапе завершаются подготовитель-

ные исследования, необходимые для работы модуля семантического анализа. На четвертом этапе в базе данных осуществляется поиск значений слов по начальным формам, полученным в результате работы системы «Диалинг». Затем значения обрабатываются модулем семантического анализа. Основной этап работы модуля семантического анализа – решение проблемы омонимии с использованием семантического словаря В.А. Тузова. После разрешения многозначности на данном этапе определяются соответствующие жесты. Результатом работы модуля являются единственные значения слов и соответствие слово–жест. Процесс семантического анализа можно условно разбить на две части: первичный семантический анализ и основной семантический анализ. Задача первичного семантического анализа заключается в определении начальных форм слова, морфологических и синтаксических характеристик, а также семантических отношений. На основе полученной информации основной семантический анализ определяет значения слов и соответствие жестам русского жестового языка.

Анализ русского текста состоит из следующих этапов: морфологического анализа слов в предложении, синтаксического анализа структуры предложения и семантического анализа слов в предложении [2].

Морфологический и синтаксический анализ выполняется на основе системы «Диалинг» [17], в которой морфологический анализ состоит из морфоанализа и лемматизации словоформ. Под лемматизацией будем понимать приведение различных форм слова к словарным, а под морфоанализом – определение морфологических характеристик слова. Работа морфологического модуля основана на использовании трех морфологических словарей: большого словаря, который базируется на грамматическом словаре А.А. Зализняка, словаря имен собственных и словаря географических слов. На этапе лемматизации происходит определение начальной формы слова, необходимой для дальнейшей работы со словарями. Морфологическая часть речи определяется традиционным образом. При анализе реальных текстов необходимо учитывать соседние слова, потому что от выбора конкретной интерпретации зависит выбор интерпретации другого слова. Объем морфологического словаря составляет более 130 тысяч лексем. Если в словаре отсутствует данная словоформа, то применяется алгоритм, который ищет в словаре словоформу, максимально совпадающую с конца со входной словоформой.

В качестве входной информации синтаксического анализа поступают результаты морфологического анализа. На выходе получаем набор семантических отношений. Определим семантическое отношение как универсальную связь, которая усматривается носителем языка в конкретном контексте. Любой текст представляет собой набор различных отношений. Главный недостаток отношений заключается в том, что одни отношения похожи на другие, но определить общие черты отношений и их различия непросто. Так как в существующих системах перевода отсутствует модуль, выполняющий семантический анализ, то далее будет более подробно рассмотрена система семантического анализа на основе предикатной модели.

4. ПРЕДИКАТНАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА ЛЕКСИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ПЕРЕВОДЕ НА РУССКИЙ ЖЕСТОВЫЙ ЯЗЫК

Рассмотрим модель выбора значения многозначного слова и омонима, основанную на логике предикатов первого порядка. Для проведения семантического анализа из морфологических характеристик, полученных на предыдущем этапе, рассмотрим только часть речи и падеж.

Морфологические характеристики слова в предложении представим в виде предиката Mch :

$$Mch(word, [speechPart, case]), \quad (1)$$

где $word$ – исходное слово (входная переменная); $speechPart$ – часть речи слова (выходная переменная); $case$ – падеж слова (выходная переменная).

Семантический словарь В.А. Тузова представим как предикат V :

$$V(word, [l_1, \dots, l_n]), \quad (2)$$

где $word$ – исходное слово (входная переменная); l_1, \dots, l_n – лексические значения слова (выходная переменная); n – количество лексических значений слова (выходная переменная).

Фразеологический оборот будет иметь вид предиката Ph :

$$Ph(word, [p_1, \dots, p_n], [sw_1, \dots, sw_n]), \quad (3)$$

где $word$ – исходное слово (входная переменная); p_1, \dots, p_n – признак нахождения слова во фразеологическом обороте (выходная переменная); sw_1, \dots, sw_n – второе слово фразеологического оборота (выходная переменная); n – количество лексических значений слова (выходная переменная).

Семантические отношения слова, полученные системой «Диалинг», определим, как предикат Sr :

$$Sr(word, sentence, [sr_1, \dots, sr_m]), \quad (4)$$

где $word$ – исходное слово (входная переменная); $sentence$ – исходное предложение (входная переменная); sr_1, \dots, sr_m – слово предложения, состоящее в семантических отношениях с анализируемым словом (выходная переменная); m – количество слов, находящихся в семантических отношениях с анализируемым словом (выходная переменная).

Класс слова представим в предикате C следующего вида:

$$C(word, [c_1, \dots, c_n]), \quad (5)$$

где $word$ – исходное слово (входная переменная); c_1, \dots, c_n – классы лексических значений (выходная переменная); n – количество лексических значений слова (выходная переменная).

Для работы семантического модуля также необходимо учесть признак необходимости для лексического значения двух подчиненных слов, который представим в виде предиката Fl :

$$Fl(word, [fl_1, \dots, fl_n]), \quad (6)$$

где $word$ – исходное слово (входная переменная); fl_1, \dots, fl_n – признак необходимости для лексического значения двух подчиненных слов (принимает значение истина/ложь) (выходная переменная); n – количество лексических значений слова (выходная переменная).

В формуле (7) представлен предикат Cth_i , определяющий класс i -го первого подчиненного слова:

$$Cth_i(word, sr_i, [cth_{i1}, \dots, cth_{ik}]), \quad (7)$$

где $word$ – исходное слово (входная переменная); sr_i – i -е слово предложения, состоящее в семантических отношениях с анализируемым словом (входная переменная); $cth_{i1}, \dots, cth_{ik}$ – классы лексических значений i -го подчиненного слова (выходная переменная); k – количество лексических значений слова (выходная переменная).

Класс j -го второго подчиненного слова будет иметь вид предиката Cth_j :

$$Cth_j(word, sr_j, [cth_{j1}, \dots, cth_{jr}]), \quad (8)$$

где $word$ – исходное слово (входная переменная); sr_j – j -е слово предложения, состоящее в семантических отношениях с анализируемым словом (входная переменная); $cth_{j1}, \dots, cth_{jr}$ – классы лексических значений j -го подчиненного слова (выходная переменная); r – количество лексических значений слова (выходная переменная).

Для определения лексического значения рассмотрим предикат решения $Decision$. Для случая, когда для подтверждения корректности лексического значения необходимо одно зависимое слово, и данное слово не входит во фразеологический оборот, то предикат $Decision$ будет иметь вид

$$Decision(word, trueMeaning, [l_1, \dots, l_n], [c_1, \dots, c_n], [speechPart, case], [fl_1, \dots, fl_n], [p_1, \dots, p_n], [sw_1, \dots, sw_n], [sr_1, \dots, sr_m], [cth_{j1}, \dots, cth_{jr}]), \quad (9)$$

где $word$ – исходное слово (входная переменная); $trueMeaning$ – корректное лексическое значение слова в данном контексте (выходная переменная); l_1, \dots, l_n – лексические значения слова (входная переменная); c_1, \dots, c_n – классы лексических значений (входная переменная); n – количество лексических значений слова (выходная переменная); $speechPart$ – часть речи слова (входная переменная); $case$ – падеж слова (входная переменная); fl_1, \dots, fl_n – при-

знак необходимости для лексического значения двух подчиненных слов (принимает значение истина/ложь) (входная переменная); p_1, \dots, p_n – признак нахождения слова во фразеологическом обороте (входная переменная); sw_1, \dots, sw_n – второе слово фразеологического оборота (входная переменная); sr_j – j -е слово предложения, состоящее в семантических отношениях с анализируемым словом (входная переменная); $cth_{j_1}, \dots, cth_{j_r}$ – классы лексических значений j -го подчиненного слова (входная переменная); r – количество лексических значений слова (входная переменная).

Иными словами, при выполнении семантического анализа предложения значение *trueMeaning* слова *word* считается корректным при отсутствии признака необходимости для данного значения двух аргументов, если предикат $P(word, trueMeaning)$ имеет значение «истина»:

$$\begin{aligned}
&P(word, trueMeaning) \leftarrow Mch(word, [speechPart, case]) \wedge V(word, [l_1, \dots, l_n]) \wedge \\
&\quad \neg Ph(word, [p_1, \dots, p_n], [sw_1, \dots, sw_n]) \wedge Sr(word, sentence, [sr_1, \dots, sr_m]) \wedge \\
&C(word, [c_1, \dots, c_n]) \wedge \neg Fl(word, [f_1, \dots, f_n]) \wedge Cth_i(word, sr_i, [cth_{i_1}, \dots, cth_{i_k}]) \wedge \quad (10) \\
&Decision(word, trueMeaning, [l_1, \dots, l_n], [c_1, \dots, c_n], [speechPart, case], \\
&\quad [fl_1, \dots, fl_n], [p_1, \dots, p_n], [sw_1, \dots, sw_n], [sr_1, \dots, sr_m], [cth_{i_1}, \dots, cth_{i_r}]).
\end{aligned}$$

Если для подтверждения корректности значения слова необходимо наличие двух зависимых слов, и данное слово не входит во фразеологический оборот, то предикат $P(word, trueMeaning)$ примет вид

$$\begin{aligned}
&P(word, trueMeaning) \leftarrow Mch(word, [speechPart, case]) \wedge V(word, [l_1, \dots, l_n]) \wedge \\
&\quad \neg Ph(word, [p_1, \dots, p_n], [sw_1, \dots, sw_n]) \wedge Sr(word, sentence, [sr_1, \dots, sr_m]) \wedge C(word, \\
&\quad [c_1, \dots, c_n]) \wedge Fl(word, [f_1, \dots, f_n]) \wedge Cth_i(word, sr_i, [cth_{i_1}, \dots, cth_{i_k}]) \wedge \quad (11) \\
&\quad Cth_j(word, sr_j, [cth_{j_1}, \dots, cth_{j_k}]) \wedge
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&Decision(word, trueMeaning, [l_1, \dots, l_n], [c_1, \dots, c_n], [speechPart, case], [fl_1, \dots, fl_n], \\
&\quad [p_1, \dots, p_n], [sw_1, \dots, sw_n], [sr_1, \dots, sr_m], [cth_{i_1}, \dots, cth_{i_r}], [cth_{j_1}, \dots, cth_{j_k}]).
\end{aligned}$$

Предикат $P(word, trueMeaning)$ для фразеологического оборота будет иметь вид (формула 12):

$$\begin{aligned}
 P(word, trueMeaning) \leftarrow & Mch(word, [speechPart, case]) \wedge V(word, [l_1, \dots, l_n]) \wedge \\
 & Ph(word, [p_1, \dots, p_n], [sw_1, \dots, sw_n]) \wedge Sr(word, sentence, [sr_1, \dots, sr_m]) \wedge \\
 C(word, [c_1, \dots, c_n]) \wedge & \neg Fl(word, [f_1, \dots, f_n]) \wedge Cth_i(word, sr_i, [cth_{i1}, \dots, cth_{ik}]) \wedge (12) \\
 Decision(word, trueMeaning, & [l_1, \dots, l_n], [c_1, \dots, c_n], [speechPart, case], [fl_1, \dots, fl_n], \\
 & [p_1, \dots, p_n], [sw_1, \dots, sw_n], [sr_1, \dots, sr_m], [cth_{i1}, \dots, cth_{ir}])
 \end{aligned}$$

На основе предложенной предикатной модели разработаны и реализованы алгоритмы, направленные на определение значений многозначных слов и омонимов, работа которых основана на взаимодействии с базой данных, включающей в себя соответствие слов русского языка жестам русского жестового языка.

5. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕКСИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ

Для повышения качества перевода и разрешения ситуаций, в которых отсутствует возможность однозначного определения значения многозначного слова, предложен статистический алгоритм на основе корпуса русского языка.

Рассмотрим упрощенное описание алгоритма выбора сочетаний альтернативных лексических значений многозначных слов и омонимов. Входное предложение представим в виде последовательности слов:

$$L(\text{последовательность Слов } l_1, \dots, l_n). \quad (13)$$

Кроме того, некоторые слова l_i предложения L могут являться многозначными и иметь несколько значений l_{ij} :

$$l_i \in L. \quad (14)$$

Множество сочетаний таких значений обозначим через M . Имеется множество сочетаний слов русского языка, полученных в рамках корпуса C [5]. Каждое словосочетание c корпуса C имеет длину $D(c)$, которая представляет собой число слов в словосочетании (от 2 до 5) и встречаемость в корпусе $Z(c)$:

$$c \in C; \quad (15)$$

$$0 < Z(c) < 1. \quad (16)$$

Необходимо выбрать наилучшее m :

$$m \in M. \quad (17)$$

Проведем следующую модификацию предложения. Исходное предложение L заменяем на L' путем замены слов $l_i \in L$ в соответствии с $m \in M$.

Для L' определим его покрытие словосочетаниями c . Алгоритм поиска покрытия начинается с первого слова в предложении L' , причем покрытия ищутся в порядке убывания $D(c)$ с продвижением до конца предложения. В общем случае будем иметь следующие покрытия:

1) k_2 покрытий длины 2, соответствующих сочетаниям $c(2)_1, c(2)_2, \dots, c(2)_{k_2}$;

2) k_3 покрытий длины 3, соответствующих сочетаниям $c(3)_1, c(3)_2, \dots, c(3)_{k_3}$;

3) k_4 покрытий длины 4, соответствующих сочетаниям $c(4)_1, c(4)_2, \dots, c(4)_{k_4}$;

4) k_5 покрытий длины 5, соответствующих сочетаниям $c(5)_1, c(5)_2, \dots, c(5)_{k_5}$.

Рассчитаем критерий оценки корректности найденного значения многозначного слова:

$$F(m) = \sum_{j=1}^{k_j} \sum_{i=2}^5 iD(c(i)_j). \quad (18)$$

Если покрытия сочетаниями длины k_3 , $2 \leq k \leq 5$, в L' отсутствуют, то они входят с нулевым весом в $F(m)$. Выбираем такое m , которое максимизирует $F(m)$.

Таким образом, разработанный алгоритм на основе корпуса русского языка позволяет решить проблему выбора лексических значений в случае, когда истинны условия для двух и более альтернативных значений в семантическом словаре В.А. Тузова.

6. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Для подтверждения работоспособности разработанного модуля проведем сравнительный анализ с существующими лидерами в электронном переводе – «Яндекс Переводчиком» и «Google Переводчиком». Для корректной оценки результата перевода на английский язык системами «Яндекс Переводчик» и «Google Переводчик» значения слов на английском языке будут определены с помощью онлайн-словаря «Мультитран». Поясним используемую процедуру перевода на следующем примере. В русском языке существуют омонимы «лиси́чка» (животное) и «лиси́чка» (гриб). В английском языке словам «лиса» и «лисичка» (животное) соответствует слово fox, слову «лисичка» (гриб) – слово chanterelle. Проанализируем корректность определения семантического значения слова «лисичка» в предложении «Лисичка убежала в лес» (рис. 4–7).

Яндекс Переводчик

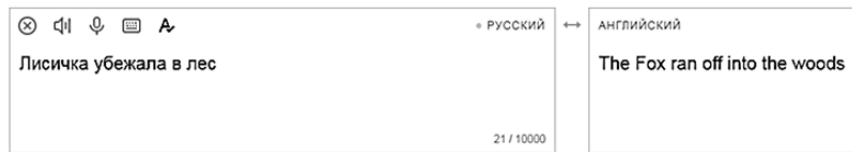


Рис. 4. Перевод системой «Яндекс Переводчик»

Fig. 4. Translation using the Yandex Translator system

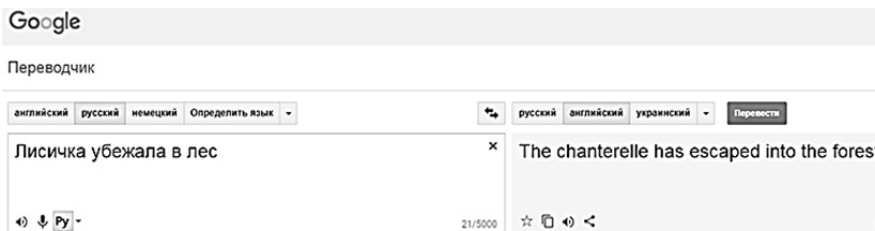


Рис. 5. Перевод системой «Google Переводчик»

Fig. 5. Translation using the Google Translator system

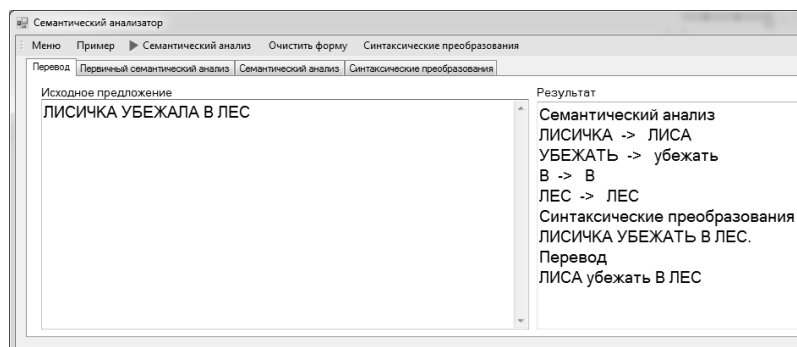


Рис. 6. Перевод системой семантического анализа

Fig. 6. Translation using the semantic analysis system

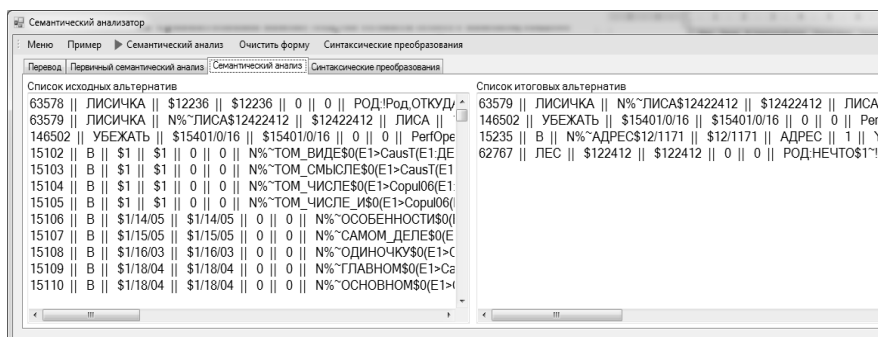


Рис. 7. Перевод системой семантического анализа (список альтернатив)

Fig. 7. Translation using the semantic analysis system (list of alternatives)

Значение слова «лисичка» корректно определено системой «Яндекс Переводчик» и модулем семантического анализа. Переводчик компании Google перевел слово «лисичка» со значением «гриб».

При сравнении использовался модуль семантического анализа без применения статистического алгоритма, рассмотренного в п. 5. Что касается определения безошибочного перевода модулем семантического анализа, то здесь необходимо отметить, что при невозможности выбрать конкретное лексическое значение программа оставляет исходное слово (предложение) без изменений. В этом случае результат работы данного модуля мы также будем считать «правильным». Следовательно, модуль семантического анализа осуществляет перевод с ошибкой, если только осуществляет замену слова на некорректное лексическое значение. Для оценки качества перевода были привлечены квалифицированные лингвисты, специалисты в лексике русского и русского жестового языков. Что касается «Яндекс Переводчика» и «Google Переводчика», то они не имели возможности, в отличие от модуля семантического анализа, оставить предложение неизменным и «были вынуждены» выполнять перевод с русского на английский, рискуя, таким образом, допустить ошибку.

Тестирование проводилось в два этапа. На первом этапе были разработаны 14 специально подобранных контрольных примеров (предложений), которые содержали многозначные слова и омонимы, разбор которых содержался в словаре В.А. Тузова. Система «Яндекс» допустила при их разборе 4 ошибки, а система «Google Переводчик» – 5 ошибок. Процент ошибок сравниваемых систем достиг 26 % [23]. С помощью разработанного модуля семантического анализа все контрольные примеры были переведены правильно.

На втором этапе тестирования модуля семантического анализа были подготовлены 100 случайно выбранных предложений в национальном корпусе русского языка [26]. При подборе данных предложений учитывалось лишь наличие в них многозначных слов и омонимов, которые входят и в словарь В.А. Тузова. Кроме того, данные слова должны были содержаться в двух-трех предложениях из ста.

В результате тестирования переводчики Google и «Яндекс» допустили ошибки в девяти предложениях из ста (модуль семантического анализа все предложения перевел правильно). Таким образом, на данной выборке разработанный модуль семантического анализа продемонстрировал 9 % преимущество в сравнении с переводчиками Google и «Яндекс».

В дальнейшем планируется провести исследование на качество перевода статистического алгоритма в разработанной системе семантического анализа предложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена модель выбора значения многозначного слова и омонима, основанная на логике предикатов первого порядка. Для повышения качества перевода и разрешения ситуаций, в которых отсутствует возможность однозначного определения значения многозначного слова, предложен статистический алгоритм на базе корпуса русского языка. Определен

критерий оценки корректности найденного значения многозначного слова. Проведен сравнительный анализ разработанного модуля семантического анализа с существующими системами «Яндекс Переводчик» и «Google Переводчик». Сделан вывод, что разработанная система семантического анализа проводит более точный перевод при наличии лексической неоднозначности. Разработанная предикатная модель с учетом статистического алгоритма позволяет в сравнении с семантическим словарем В.А. Тузова решить проблему выбора лексического значения в случае, когда истинны условия для двух и более альтернативных значений. В данной ситуации определяется лучшее сочетание лексических значений по критерию близости к корпусу русского языка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Veale T., Conway A.* Cross modal comprehension in ZARDOZ an English to sign-language translation system // Proceedings of the Seventh International Workshop on Natural Language Generation. – Kennebunkport, Maine, 1994. – P. 249–252.
2. *Andre E.* The generation of multimedia presentations // Handbook of Natural Language Processing. – New York: Marcel Dekker, 2000. – Ch. 12. – P. 305–328.
3. *Wakefield M.* VisiCAST Milestone: final report N IST-1999-10500 / Information Societies Technology. – [S. l.], 10 December 2002. – 97 p.
4. Многоцелевой лингвистический процессор ЭТАП-3 [Электронный ресурс]. – URL: <http://iitp.ru/ru/researchlabs/922.htm> (дата обращения: 22.03.2019).
5. АБВУ Intelligent Search SDK [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.abbyy.com/ru-ru/isearch/compreno/> (дата обращения: 22.03.2019).
6. ТЕХТERRA. Технология автоматического построения онтологий и семантического анализа текста [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ispras.ru/technologies/texterra/> (дата обращения: 22.03.2019).
7. Яндекс Переводчик. О сервисе [Электронный ресурс]. – URL: <https://translate.yandex.ru/about> (дата обращения: 22.03.2019).
8. Яндекс. Технологии. Машинный перевод [Электронный ресурс]. – URL: <https://yandex.ru/company/technologies/translation/> (дата обращения: 22.03.2019).
9. About Google Translate [Electronic resource]. – URL: <https://translate.google.com/intl/en/about/> (accessed: 22.03.2019).
10. *Baldwin R.* Google introduces Google Translate Chrome Extension for inline translations of text [Electronic resource] // The Next Web. – October 16, 2014. – URL: <https://thenextweb.com/google/2014/10/16/google-introduces-google-translate-chrome-extension-inline-translations-text/> (accessed: 22.03.2019).
11. Franz Och, Ph.D., expert in machine learning and machine translation: press release. – La Jolla, CA: Human Longevity, 2014. – 2 p.
12. *Och F.* Statistical machine translation: foundations and recent advances: tutorial at MT Summit 2005 Phuket, Thailand, September 12, 2005 / Google. – Phuket, 2005. – P. 1–4.
13. *Tanner A.* Google seeks world of instant translations [Electronic resource] // Thomson Reuters. – 2007. – March 28. – URL: <https://www.reuters.com/article/us-google-translate/google-seeks-world-of-instant-translations-idUSN1921881520070328> (accessed: 22.03.2019).
14. *Le Q., Schuster M.* A neural network for machine translation, at production scale [Electronic resource] // Google Research Blog. – 2016. – September 27. – URL: <https://research.googleblog.com/2016/09/a-neural-network-for-machine.html> (accessed: 22.03.2019).
15. MT on and for the Web / C. Boitet, H. Blanchon, M. Seligman, V. Bellynyck // Proceedings of the 6th International Conference on Natural Language Processing and Knowledge Engineering (NLPKE-2010). – IEEE, 2010. – P. 1–10.

16. Разработка словаря сибирского диалекта русского жестового языка: учебное пособие / А.А. Бертик, М.Г. Гриф, С.В. Елфимова, О.О. Королькова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 63 с.

17. Сокирко А.В. Семантические словари в автоматической обработке текста (по материалам системы ДИАЛИНГ): дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17. – М., 2001. – 88 с.

18. Ткачева Т.А., Ахмедышева Н.А. Жестовый язык глухих как особая знаковая коммуникативная система (на материале русского и французского жестовых языков) // Приоритеты и интересы современного общества: материалы Международной научно-практической конференции. – Астрахань, 2010. – С. 361–365.

19. Тузов В.А. Компьютерная семантика русского языка: учебное пособие. – СПб.: СПбГУ, 2003. – 391 с.

20. Гриф М.Г., Мануева Ю.С., Козлов А.Н. Построение системы компьютерного сурдоперевода русского языка // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 6 (37). – С. 170–183. – doi: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.37.11>.

21. Гриф М.Г., Тимофеева М.К. Проблема автоматизации сурдоперевода с позиции прикладной лингвистики // Сибирский филологический журнал. – 2012. – № 1. – С. 211–219.

22. Гриф М.Г. Методы и технологии компьютерного сурдоперевода: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 71 с.

23. Гриф М.Г., Королькова О.О., Мануева Ю.С. Разработка алгоритмического и программного обеспечения выбора значения многозначного слова и омонима в системе компьютерного сурдоперевода русского языка на основе семантической модели // Вестник НГУ. Серия: Лингвистика и межкультурная коммуникация. – 2018. – Т. 16, № 3. – С. 32–44.

24. Воскресенский А.Л. Сопоставительное лексикографическое описание слов русского языка и жестов языка глухих России в словаре RuSLED // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. – 2008. – № 7 (14). – С. 91–96.

25. Мельчук И.А. Русский язык в модели Смысл \Leftrightarrow Текст: учебное пособие. – М.: Языки русской культуры, 1995. – 682 с.

Кагиров Ильдар Амирович – младший научный сотрудник, аспирант лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. Область научных интересов: речевые и многомодальные интерфейсы. Опубликовано 6 научных работ. E-mail: kagirov@iiias.spb.su

Мануева Юлия Сергеевна – аспирант кафедры автоматизированных систем управления факультета автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – компьютерный сурдопереводчик. Опубликовано 21 научная работа. E-mail: manueva.js@gmail.com

Kagirov Ildar Amirovich, a junior research worker, a postgraduate student in the laboratory of speech and multimodal interfaces in the St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. His research interests include speech and multimodal interfaces. He has published 6 research papers. E-mail: kagirov@iiias.spb.su

Manueva Yulia Sergeevna, a postgraduate student at the department of automation and computer engineering in the Novosibirsk State Technical University. His research interests include computer sign language interpretation. She has published 21 research papers. E-mail: manueva.js@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-41-60

Development of a predicate model for choosing lexical meanings when translating into the Russian sign language based on the V.A. Tuzov's semantic dictionary and the Dialing text processing systems *

I.A. KAGIROV^{1,a}, J.S. MANUEVA^{2,b}

¹ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, 39, 14th Line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 1199178, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a kagirov@iias.spb.su ^b manueva.js@gmail.com

Abstract

Existing systems of semantic analysis of the Russian language are considered: multipurpose linguistic processor "ETAP-3", ABBYY Compreno technology, Texterra technology, statistical and neural network approaches in Yandex Translator and Google Translator. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of these systems, it was concluded that it was necessary to develop a semantic analysis system for improving the quality of interpretation and introducing interpretation from the sounding Russian language into the Russian sign language into the system called "Surdofon". The purpose of this article is to describe the developed predicate model of semantic analysis of the Sign Language Interpretation computer system based on V.A. Tuzov's semantic dictionary. To determine the correct meaning of a polysemantic word and a homonym in a sentence the "Dialing" system, V.A. Tuzov's dictionary and a list of gestures of the Russian sign language were used. A model for choosing the meaning of a polysemantic word and a homonym based on the logic of first-order predicates is considered. When performing a semantic analysis of the sentence, the meaning of trueMeaning of the word is considered correct if the predicate P (word, trueMeaning) has the meaning "True". To improve the interpretation quality and resolution of situations in which there is no possibility of unambiguous determining the meaning of a polysemantic word, a statistical algorithm is proposed based on of the Russian language corpus. The criterion for evaluating the correctness of the obtained meaning of a polysemantic word is found. A comparative analysis of the developed module with the existing Yandex Translator and Google Translator systems was made. It is concluded that the developed semantic analysis system gives a more accurate interpretation in the presence of lexical ambiguity. The developed predicate model taking into account the statistical algorithm as compared with the V.A. Tuzov semantic dictionary makes it possible to solve the problem of choosing lexical values in the case when the conditions for two or more alternative meanings are true. In this situation, the best combination of lexical meanings is determined by the criterion proximity to the Russian language corpus.

Keywords: Russian sign language, computer sign interpretation, semantic analysis, predicate model, homonyms, statistical analysis

REFERENCES

1. Veale T., Conway A. Cross modal comprehension in ZARDOZ an English to sign-language translation system. *Proceedings of the Seventh International Workshop on Natural Language Generation*, Kennebunkport, Maine, 1994, pp. 249–252.
2. Andre E. The generation of multimedia presentations. *Handbook of Natural Language Processing*. New York, Marcel Dekker, 2000, ch. 12, pp. 305–328.

* Received 05 September 2018.

3. Wakefield M. *VisiCAST Milestone: final report no. IST-1999-10500*. Information Societies Technology, 10 December 2002. 97 p.
4. *Mnogotselevoi lingvicheskii protessor ETAP-3* [ETAP-3 multipurpose linguistic processor]. Available at: <http://iitp.ru/ru/researchlabs/922.htm> (accessed 22.03.2019).
5. *ABBYY Intelligent Search SDK*. (In Russian). Available at: <https://www.abbyy.com/ru-ru/isearch/compreno/> (accessed 22.03.2019).
6. *TEXTERRA. Tekhnologiya avtomaticheskogo postroeniya ontologii semanticheskogo analiza teksta* [TEXTERRA. Technology for automatic ontology construction and semantic text analysis]. Available at: <http://www.ispras.ru/technologies/texterra/> (accessed 22.03.2019).
7. *Yandex Perevodchik. O servise* (Yandex Translator about the service) <https://translate.yandex.ru/about> (accessed 22.03.2019).
8. *Yandex. Tekhnologii. Mashinnyi perevod* [Yandex technology. Machine translation]. Available at: <https://yandex.ru/company/technologies/translation/> (accessed 22.03.2019).
9. *About Google Translate*. Available at: <https://translate.google.com/intl/en/about/> (accessed 22.03.2019).
10. Baldwin R. Google introduces Google Translate Chrome Extension for inline translations of text. *The Next Web*, October 16, 2014. Available at: <https://thenextweb.com/google/2014/10/16/google-introduces-google-translate-chrome-extension-inline-translations-text/> (accessed 22.03.2019).
11. Franz Och, Ph.D., *expert in machine learning and machine translation*: press release. La Jolla, CA, Human Longevity, 2014. 2 p.
12. Och F. *Statistical machine translation: foundations and recent advances*: tutorial at MT Summit 2005 Phuket, Thailand, September 12, pp. 1–4.
13. Tanner A. Google seeks world of instant translations. *Thomson Reuters*, 2007, March 28. Available at: <https://www.reuters.com/article/us-google-translate/google-seeks-world-of-instant-translations-idUSN1921881520070328> (accessed 22.03.2019).
14. Le Q., Schuster M. A neural network for machine translation, at production scale. *Google Research Blog*, 2016, September 27. Available at: <https://research.googleblog.com/2016/09/a-neural-network-for-machine.html> (accessed 22.03.2019).
15. Boitet C., Blanchon H., Seligman M., Belynyck V. MT on and for the Web. *Proceedings of the 6th International Conference on Natural Language Processing and Knowledge Engineering (NLPKE-2010)*, IEEE, 2010, pp. 1–10.
16. Bertik A.A., Grif M.G., Elfimova S.V., Korolkova O.O. *Razrabotka slovyarja sibirskogo dialekta russkogo zhestovogo yazyka* [Development of the dictionary of the Siberian dialect of Russian sign language]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 63 p.
17. Sokirko A.V. *Semanticheskie slovari v avtomaticheskoi obrabotke teksta (po materialam sistemy DIALING)*. Diss. kand. tekhn. nauk [Semantic dictionary in automated text processing. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2000. 88 p.
18. Tkacheva T.A., Akhmedysheva N.A. [The sign language of the deaf as a special sign communication system (based on Russian and French sign languages)]. *Prioritety i interesy sovremenogo obshchestva: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Materials of the International scientific and practical conference "Priorities and Interests modern society". Astrakhan, 2010, pp. 361–365. (In Russian).
19. Tuzov V.A. *Komp'yuternaya semantika russkogo yazyka* [Computer semantic of Russian language]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2003. 391 p.
20. Grif M.G., Manueva Yu.S., Kozlov A.N. Postroenie sistemy komp'yuternogo surdoperevoda russkogo yazyka [Computer sign language interpretation system development of Russian language]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2014, iss. 6 (37), pp. 170–183. doi: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.37.11>.
21. Grif M.G., Timofeeva M.K. Problema avtomatizatsii surdoperevoda s pozitsii prikladnoi lingvistiki [Sign language machine translation as a problem of applied linguistics]. *Sibirskii filologicheskii zhurnal – Siberian Philological Journal*, 2012, no. 1, pp. 211–219.
22. Grif M.G. *Metody i tekhnologii komp'yuternogo surdoperevoda* [Methods and techniques of computer sign language]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2012. 71 p.

23. Grif M.G., Korolkova O.O., Manueva Yu.S. Razrabotka algoritmicheskogo i programnogo obespecheniya vybora znacheniya mnogoznachnogo slova i omonima v sisteme komp'yuternogo surdoperevoda russkogo yazyka na osnove semanticheskoi modeli [A new algorithm and other software for disambiguation of polysemy and homonymy for computer translation into Russian Sign Language based on a semantic principle]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Lingvistika i mezhkul'turnaya kommunikatsiya – Vestnik NSU. Series: Linguistics and Intercultural Communication*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 32–44.

24. Voskresenskii A.L. Sopostavitel'noe leksikograficheskoe opisanie slov russkogo yazyka i zhestov yazyka glukhikh Rossii v slovare RuSLED [Comparative lexicographic description of Russian words and gestures of Russian sign language the deaf language in RuSLED dictionary]. *Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nye tekhnologii – Computational linguistics and intellectual technologies*, 2008, no. 7 (14), pp. 91–96.

25. Mel'chuk I.A. *Russkii yazyk v modeli Smysl <=> Tekst* [Russian language in the model Meaning <=> Text]. Moscow, Yazyki russkoi kul'tury Publ., 1995. 682 p.

Для цитирования:

Кагиров И.А., Магужева Ю.С. Разработка предикатной модели выбора лексических значений при переводе на русский жестовый язык на основе семантического словаря В.А. Тузова и системы автоматической обработки текста «Диалинг» // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 41–60. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-41-60.

For citation:

Kagirov I.A., Manueva Yu.S. Razrabotka predikatnoi modeli vybora leksicheskikh znachenii pri perevode na russkii zhestovyi yazyk na osnove semanticheskogo slovarya V.A. Tuzova i sistemy avtomaticheskoi obrabotki teksta "Dialing" [Development of the predicate model for choosing lexical meanings when translating into Russian sign language based on V.A.Tuzov's semantic dictionary and text processing systems "Dialing"]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 41–60. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-41-60.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.2

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-61-76

Специализированная установка для исследования биофизических процессов, протекающих в кожном покрове*

Л.И. ЛИСИЦЫНА^{1,a}, Л.Г. НАВРОЦКИЙ^{2,b}, А.А. БЛОХИН^{1,c},
С.В. БЕЛАВСКАЯ^{1,d}, А.Е. КАМАРДИН^{1,e}, И.С. ГЕВОРГЯН^{1,f},
Н.С. ЧИРКОВА^{1,g}

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

² 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 15 Б, Институт лазерной физики СО РАН

^a lisitcinali@gmail.com ^b leonid.navrotsky@gmail.com ^c snakebss@mail.ru

^d BelavskayaSV@gmail.com ^e aekam4@gmail.com

^f ya.irinagevorgyan2013@yandex.ru ^g chns5694@gmail.com

Проведено обоснование возможности исследований биофизических процессов в кожном покрове на базе вынужденного свечения. Описана разработанная специализированная установка с программным обеспечением, предназначенная для исследований биофизических процессов, протекающих в кожном покрове, основной особенностью которой является наличие узла возбуждения и регистрации свечения кожного покрова. Проведены эксперименты по изучению некоторых биофизических процессов, протекающих в кожном покрове, в частности, по выяснению причин различия структур картин свечения кожного покрова в области акупунктурных точек (АТ). Представлены результаты предварительных исследований, проведенных на меридианах легких, сердца, перикарда, почек, толстой кишки, трех обогревателей и желудка. Обнаружено, что зависимость структуры картин свечения от внешних условий и характеристик испытуемого пренебрежимо мала. Показано, что одна из возможных причин различия структур картин свечения кожного покрова в области АТ – тип меридиана. Но, вероятно, эта причина не является единственной, так как в ранее полученных данных наблюдался некоторый разброс типов картин свечения в области АТ, расположенных на определенном меридиане кожного покрова. Подтвержден ранее сделанный вывод о том, что АТ светится при оптическом воздействии, если точки находятся на активном меридиане либо на меридиане, отвечающем за орган с патологией. С целью получения более достоверных выводов, отыскания связи типа структуры с параметрами окружающей среды, характеристиками самих испытуемых, а также активностью меридиана необходимо продолжать исследования и набирать более обширную статистику. Проведенные эксперименты показали, что разработанная установка соответствует поставленной задаче и является высокоэффективной для исследования биофизических процессов, протекающих в кожном покрове.

* Статья получена 06 сентября 2018 г.

Ключевые слова: установка специализированная, возбуждение и регистрация свечения, узел, кожный покров, биофизические процессы, исследования, меридианы, структуры картин свечения

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее чувствительные периферические элементы кожного покрова – акупунктурные точки (АТ), являющиеся местом приложения воздействующего фактора (физических полей) при осуществлении рефлексотерапии [1–3]. Рефлексотерапия имеет определенные достоинства, однако в настоящее время она не получила широкого распространения в медицинских учреждениях России. Одна из причин этого – недостаточная глубина исследования биофизических процессов, протекающих в кожном покрове в области АТ, и сложность их локализации.

Ранее авторам удалось локализовать акупунктурные точки (биологически активные точки) по их вынужденному свечению при внешнем оптическом воздействии, т. е. зафиксировать свечение кожного покрова, возникшего под действием происходящих биофизических процессов в кожном покрове при внешнем оптическом воздействии. Получено несколько структур картин свечения кожного покрова в области АТ. Причины различия этих структур пока не выявлены. Изучение некоторых биофизических процессов, протекающих в кожном покрове (в частности, выяснение причин различия структур картин свечения АТ, их возможной зависимости от состояния человека), – серьезная задача современной медицины, а создание устройства, позволяющего проводить подобные исследования, – актуальная задача медицинской техники.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1. Разработать специализированную установку, обеспечивающую возможность проведения исследований биофизических процессов, протекающих в кожном покрове.

2. Выявить причины различия структур картин свечения кожного покрова в области АТ, используя разработанную установку.

3. Выявить взаимосвязь структур картин свечения с физическим состоянием человека, его характеристиками, внешними условиями, типом меридиана, его активностью и т. д.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Внимание пытливых научных умов всего мира постоянно направлено на изучение биофизических процессов, протекающих в биологических объектах. Например, в работе [4] анализируется полевая (нехимическая) форма межклеточного взаимодействия (межклеточная коммуникация) посредством оптического взаимодействия в многоклеточном организме. В частности, установлено, что низкоинтенсивное когерентное излучение клеток усиливает эффект дистанционного межклеточного взаимодействия. Когерентное излучение отдельных клеток, объединенное в поле целостного организма, может выступать в качестве форморегулирующего фактора [4]. В статье [5] рассматривается

модель пути передачи информации от АТ к центральной нервной системе с учетом оптического взаимодействия. Однако исследование биохимических процессов на основе полевой коммуникации биосистем затруднено, так как «распознавание сверхслабых сигналов биохемилюминесценции на фоне существенно более интенсивной освещенности» [4] технически сложно.

В межвузовской лаборатории (НГТУ–НГМУ–ИФЛ, Новосибирск) медицинской электроники предприняты попытки изучения биофизических процессов в кожном покрове в области АТ. Для исследования биофизических процессов предложено от спонтанной биохемилюминесценции (ввиду ее малости) перейти к вынужденной флуоресценции молекул под действием импульсного оптического воздействия.

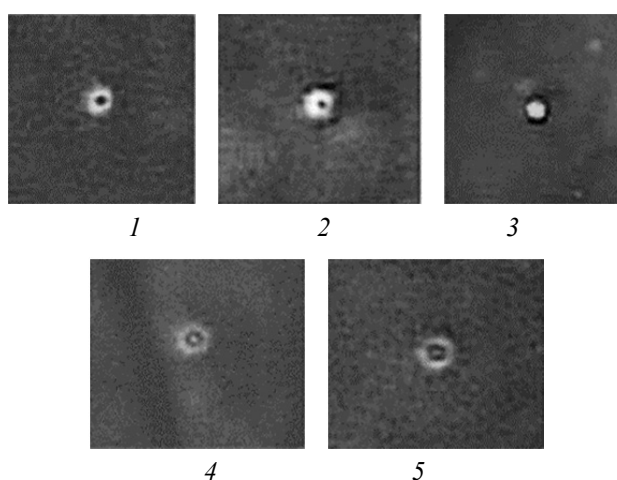


Рис. 1. Структуры картин вынужденного свечения кожного покрова в области АТ:

1 – черная сердцевина с белым ореолом, 2 – черная сердцевина с двумя ореолами (белым и темным), 3 – белая сердцевина с темным ореолом, 4 – белая сердцевина с двумя ореолами (темным и белым), 5 – белая сердцевина с тремя ореолами (темным, белым, темным)

Fig. 1. The structure of the paintings of the forced glow of the skin in the area of AP:

1 – black core with white halo, 2 – black core with two halos (white and dark), 3 – white core with dark halo, 4 – white core with two halos (dark and white), 5 – white core with three halos (dark, white, dark)

Для исследования процессов, происходящих в кожном покрове в области АТ, прежде всего необходимо четко локализовать положение этих точек. Сегодня поиск АТ проводится в основном по топографии, по электрическому сопротивлению кожного покрова в области АТ и по болевому эффекту (при наличии патологии соответствующего органа). Каждый из перечисленных способов имеет свои достоинства и недостатки. Точное определение положения АТ по топографии может провести только рефлексотерапевт с большим опытом работы. Определение по электрическому сопротивлению сложно, так как электрическое сопротивление кожного покрова в области АТ зависит не

только от состояния соответствующего органа, но и от состояния кожи, внешних условий, времени регистрации и др. Кроме того, при этом на организм оказывается хоть и минимальное, но осязаемое электрическое воздействие. Поиск по болевому эффекту наносит прямой дискомфорт пациенту и не всегда достоверен [1].

В качестве альтернативы этих способов авторами было предложено локализовать АТ оптическим методом. При импульсной засветке кожного покрова в области АТ, одновременной фотофиксации в макрорежиме и дальнейшей обработке на ПК были обнаружены светящиеся точки округлой формы. Была выдвинута гипотеза, что именно акупунктурные точки проявляют себя таким образом при внешнем оптическом воздействии. Эта гипотеза была подтверждена при поиске АТ всеми существующими на сегодня методами [6–8], т. е. впервые была осуществлена визуализация АТ [9]. Во всех дальнейших исследованиях локализация АТ осуществлялась по их свечению при оптическом воздействии. Впервые получено несколько различных структур картин свечения кожного покрова в области АТ (рис. 1) [6, 7]. Данная работа направлена на выявление причин этих различий.

3. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ РАЗЛИЧИЯ СТРУКТУР КАРТИН СВЕЧЕНИЯ

На наш взгляд, может быть несколько причин влияния на структуру картин свечения кожного покрова в области АТ. Основные из них [10]:

- влияние физического состояния человека (анамнез);
- влияние индивидуальных характеристик человека (пол, возраст, рост, вес, частота сердечных сокращений (ЧСС), артериальное давление (АД) и т. д.);
- психоэмоциональное состояние человека, состояние его нервной системы;
- влияние внешних условий (атмосферное давление $P_{\text{атм}}$, температура воздуха T , влажность RH);
- тип меридиана;
- активность меридиана (промежуток времени, который является наилучшим периодом для лечебного воздействия на орган) [12, 13].

4. ВЫБОР АКУПУНКТУРНЫХ МЕРИДИАНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В современной традиционной медицине рассматривается 14 меридианов (12 симметричных и 2 несимметричных). Шесть основных меридианов имеют энергетическую связь с легкими, селезенкой, поджелудочной железой, сердцем, перикардом, почками и печенью. Вспомогательные меридианы имеют энергетическую связь с толстой кишкой, тонкой кишкой, желудком, мочевым пузырем, желчным пузырем и тремя обогревателями (верхним: легкие и сердце; средним: желудок и селезенка; нижним: почки, печень, тонкая кишка, толстая кишка и мочевой пузырь) – комплексом органов, управляющих температурой тела. Два несимметричных меридиана (передний срединный и задний срединный) не связаны с конкретными органами [12, 13].

Для проведения исследований в данной работе выбраны 7 меридианов: 4 главных (меридианы легких, сердца, перикарда и почек) и 3 вспомогательных (меридианы толстой кишки, трех обогревателей и желудка) (рис. 2).

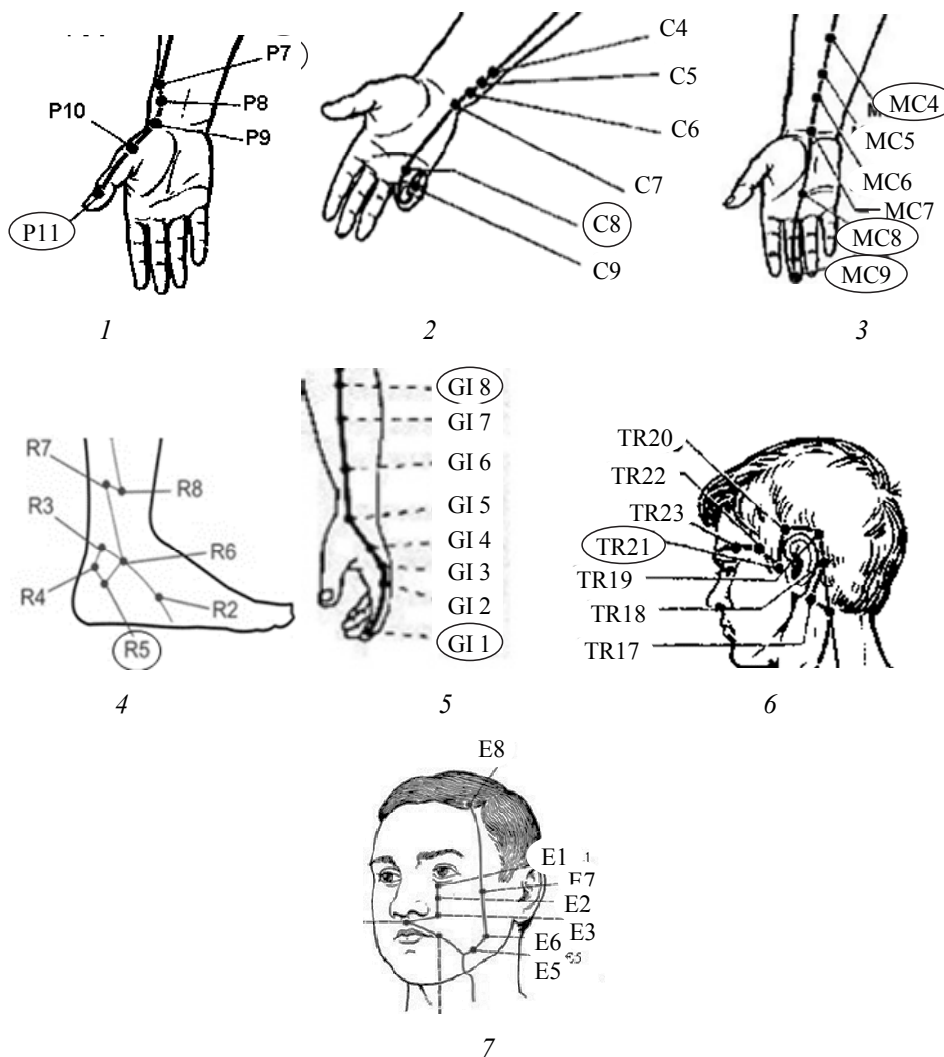


Рис. 2. Расположение исследуемых меридианов (выделены точки, на которых были получены картины вынужденного свечения):

1 – меридиан легких, 2 – меридиан сердца, 3 – меридиан перикарда, 4 – меридиан почек, 5 – меридиан толстой кишки, 6 – меридиан трех обогревателей, 7 – меридиан желудка

Fig. 2. The location of the investigated meridians (highlighted the points at which the pictures were obtained forced the glow):

1 – meridian of lung, 2 – meridian of heart, 3 – meridian of pericardium, 4 – meridian of kidney, 5 – meridian of colon, 6 – meridian of three heaters, 7 – meridian of stomach

5. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментов ранее в лаборатории создан универсальный комплекс для исследования и оценки электрофизических параметров кожного покрова малой площади и многофакторного физиотерапевтического воздействия [14]. На базе этого комплекса для исследования биофизических процессов, протекающих в кожном покрове, разработана специализированная установка, особенностью которой является наличие узла возбуждения и регистрации свечения кожного покрова в области АТ, обеспечивающего затемнение определенного участка на кожном покрове и засветку окружающих участков в широком спектральном диапазоне [11]. Для этого в качестве излучателя использована лампа импульсная фотоосветительная ксеноновая с кварцевой колбой [15]. В качестве регистрирующей камеры использована цифровая фотокамера Nikon 3300 (матрица 24 Мп) [16]. В момент съемки световой поток от излучателя засвечивает прилегающую к затемненной площадке область, через которую проходит исследуемый меридиан. Устройство позволяет проводить съемку кожного покрова в области исследуемой АТ без ее засветки, при ее непосредственной засветке, а также АТ, расположенной в затемненной области [17]. После фотофиксации свечения кожного покрова в области АТ информация передается на ПК, где проводится анализ фотографий в графическом редакторе с возможным оптическим увеличением изображений в среднем до четырех раз (с электронным – до 300 раз) и изменением резкости для улучшения качества визуализации и определения структуры картин свечения кожного покрова в области АТ.

Для приемлемой регистрации картин свечения кожного покрова в области АТ в установке предусмотрены возможности изменения параметров оптических импульсов возбуждения (длительности, мощности) и параметров регистрирующих процессов (время выдержки, чувствительность), а также временные соотношения между возбуждающими и регистрирующими процессами. На рис. 3 представлена функциональная схема разработанной установки. Установка состоит из четырех частей: узла возбуждения и регистрации свечения АТ (рис. 4), контроллера управления (рис. 5), блока питания и управления (рис. 6) и персонального компьютера.



Рис. 3. Функциональная схема установки

Fig. 3. Functional diagram of installation

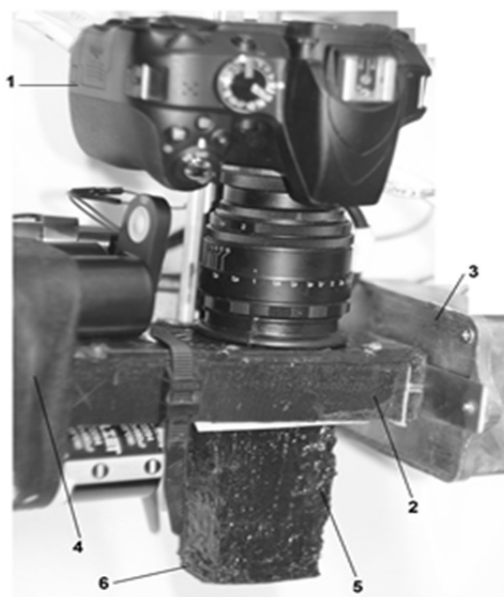


Рис. 4. Фотография узла возбуждения и регистрации свечения АТ:

1 – цифровая фотокамера, 2 – излучатель ИФК 2000, 3 – блок поджига излучателя, 4 – источник питания, 5 – тубус с черным силиконовым покрытием, 6 – резиновый уплотнитель

Fig. 4. Photograph of the node of excitation and registration of the AP luminescence:

1 – a digital camera, 2 – emitter IFC 2000, 3 – unit ignition radiator, 4 – a power source, 5 – tube with black silicone coating, 6 – a rubber seal



Рис. 5. Фотография контроллера управления

Fig. 5. Photo of control controller



Рис. 6. Фотография блока питания и управления

Fig. 6. Photograph of power supply and control

Все дальнейшие исследования проводились на базе этого устройства.

6. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ

Для работы с установкой используется официальное программное обеспечение от «Denkovi Software» – USB 8 Relay Manager [18]. Программа представляет собой утилиту для управления платой с реле. Экспериментальным путем было выяснено, при каких задержках между переключениями реле можно получить наиболее четкое изображение биологически активной точки. В результате проведенных опытов был разработан алгоритм получения серий фотографий с определенными временами задержки между срабатыванием фотоаппарата и световым импульсом. Данный алгоритм был перенесен в программу, экспортирован и сохранен в облачном хранилище. Это позволяет использовать разработанный алгоритм на любом устройстве после скачивания его из облака и установки драйверов для программы и платы управления реле. На текущий момент алгоритм представляет собой проведение серии из трех фотографий с промежутком в 3 с. Задержка между электрическим сигналом, запускающим срабатывание фотоаппарата, и световым импульсом – 200 мс. Задержка срабатывания затвора фотоаппарата регулируется вручную, что позволяет получить более гибкую настройку каждого отдельного эксперимента.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на разработанной установке, сведены в табл. 1 и 2, куда внесены все признаки, которые, на наш взгляд, могут повлиять на структуры картин свечения кожного покрова, приведенные на рис. 1.

Таблица 1

Table 1

Параметры окружающей среды и меридианов

Environmental parameters and meridians

№ п/п	RH, %	$P_{\text{атм}}$, мм рт. ст.	T , °C	Меридиан	Номер АТ	Активность меридиана, часы	Время замеров, часы	Состояние меридиана	Номер структуры на рис. 1
1	66	740	24	легких	P11	3–5	12–14	–	1
2	66	740	24	легких	P9	3–5	17–21	–	1
3	66	740	24	легких	P8	3–5	17–21	–	1
4	66	740	24	легких	P7	3–5	12–14	–	1
5	68	772	23	сердца	C8	11–13	12–14	+	5
6	58	742	22	перикарда	MC9	19–21	17–21	+	2
7	68	750	21	перикарда	MC8	19–21	17–21	+	2
8	70	736	23	перикарда	MC4	19–21	17–21	+	2
9	65	755	20	толстой кишки	GI8	5–7	17–21	–	4
10	70	736	23	толстой кишки	GI1	5–7	17–21	–	4
11	61	755	22	желудка	E7	7–9	12–14	–	4
12	74	744	20	трех обогревателей	TR21	21–23	17–21	–	3
13	66	740	24	почек	R5	17–19	17–19	+	5

Прочерк (–) в колонке «состояние меридиана» означает, что в процессе проведения исследования соответствующий меридиан находился в неактивном состоянии.

Таблица 2

Table 2

Параметры исследуемых
Parameters of the studygroup

№ п/п	Пол	Возраст, лет	Рост, см	Вес, кг	ЧСС, уд/мин	АД, мм рт. ст.	T, °C	Анамнез
1-4	м	36	182	100	76	110/70	36,3	Курящий
5	м	35	185	91	62	118/73	36,6	Курящий
6	м	56	180	90	75	118/74	36,5	–
7-8	м	35	185	91	67	120/78	36,7	Курящий
9	м	22	185	82	68	128/60	36,6	Дискомфорт в животе
10	ж	23	173	60	58	114/65	36,4	Дискомфорт в животе
11	м	56	180	90	70	117/78	36,4	Дискомфорт в животе
12	м	56	180	90	70	110/74	36,4	–
13	м	56	180	90	70	110/75	36,4	–

Прочерк (–) в колонке «Анамнез» означает отсутствие жалоб у испытуемого.

Первые исследования проведены на меридиане легких. У одного испытуемого получены картины свечения точек P11, P9, P8, P7. Структура картин свечения этих точек одинакова и соответствует структуре 1 на рис. 1, причем этот меридиан находился в неактивном состоянии, но испытуемый был с патологией легких (курящий). Далее были исследованы картины свечения АТ, расположенных на меридианах сердца и перикарда. Меридиану сердца соответствует структура 5 на рис. 1. В разные дни у одного и того же исследуемого была получена одна и та же картина свечения АТ 2 на меридиане перикарда (точки MC4 и MC8) (табл. 1). У второго испытуемого также на меридиане перикарда получена та же самая картина свечения на точке MC9. На меридиане толстой кишки для двух испытуемых в разное время получены картины свечения, соответствующие структуре АТ 4. Данная структура также соответствует меридиану желудка. Возможно, картина свечения 4 должна соответствовать меридианам, связанным с органами пищеварения (желудок и толстая кишка). На меридиане трех обогревателей получена картина свечения АТ со структурой 3. Испытуемый не имел патоло-

гий, но меридиан находился в активном состоянии. Структура картины свечения кожного покрова в области АТ на меридиане почек показана на рис. 1 (3), т. е. совпала со структурой картины на меридиане сердца. Возможно, такое совпадение объясняется тем, что почки участвуют в деятельности сердечно-сосудистой системы [11].

На рис. 7 в качестве примера представлены фотографии картин свечения АТ на меридианах трех обогревателей TR21 (рис. 7, а) и меридиане желудка E7 (рис. 7, б), расположенных в окрестностях левого уха.

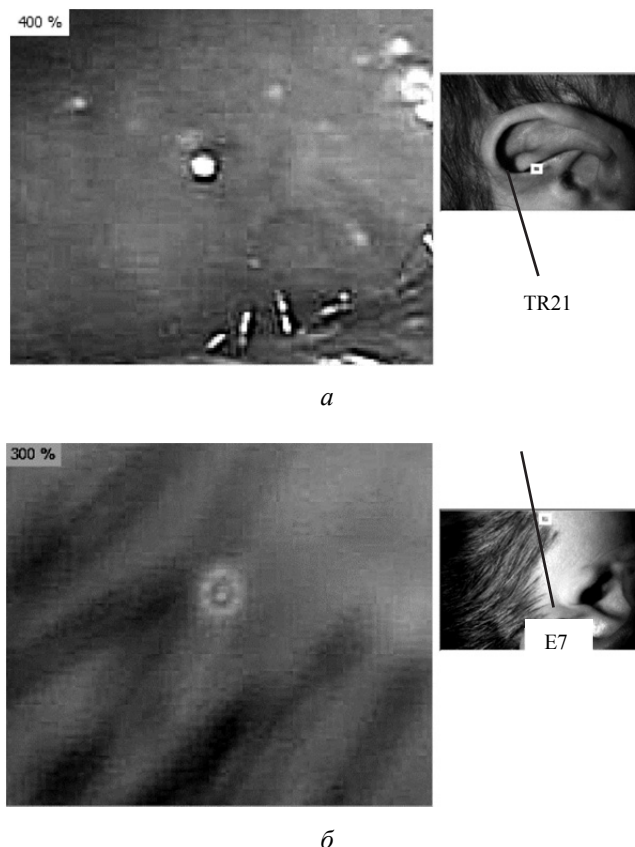


Рис. 7. Фотографии картин свечения на меридианах трех обогревателей (а) и желудка (б)

Fig. 7. Photos of the pictures of the glow on the meridians of the three heaters (a) and stomach (b)

Также исследования были проведены на аурикулярной точке AP92, которая имеет энергетическую связь с мочевым пузырем. Структура картины свечения этой точки соответствовала структуре 3. В табл. 1 структуру 3 имела картина свечения АТ TR21 (меридиан трех обогревателей). Данное совпадение структур картин свечения, возможно, обусловлено тем, что нижняя часть меридиана трех обогревателей имеет энергетическую связь с мочевым пузырем [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя результаты исследований, проведенные на разработанной установке (данные таблиц и рисунки), можно сделать некоторые предварительные выводы.

1. Разработанная специализированная установка соответствует поставленной задаче и является высокоэффективной для исследования процессов, протекающих в кожном покрове.

2. Подтвержден ранее сделанный вывод о том, что АТ светится при оптическом воздействии, если точки находятся на активном меридиане либо на меридиане, отвечающем за орган с патологией.

3. Зависимость структуры картин свечения от внешних условий и характеристик испытуемого пренебрежимо мала.

4. Обнаружены некоторые зависимости структур картин свечения от типа меридиана: меридиан легкого – структура 1, меридиан сердца и почек – структура 5, меридиан перикарда – структура 2, меридиан толстой кишки и меридиан желудка (меридианы, отвечающие за пищеварение) – структура 4, меридиан трех обогревателей – структура 3.

5. Однако ранее в работе [7] на меридиане толстой кишки была обнаружена не только структура 4, но и структура 5, а на меридиане перикарда – не только структура 2, но и другие. Следовательно, причина различия структур (тип меридиана), вероятно, не является единственной.

Дальнейшая работа будет направлена на выявление связи типа структуры с различными параметрами окружающей среды, характеристиками самих испытуемых, а также активностью меридианов. Необходимо продолжать исследования и набирать более обширную статистику по структурам вынужденного оптического излучения кожного покрова в области АТ на базе разработанной специализированной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Портнов Ф.Г.* Электропунктурная рефлексотерапия. – 3-е изд. – Рига: Зинатне, 1987. – 352 с.
2. *Колтовой Н.А.* Неэлектромагнитные поля. Психофизика. Кн. 22. Биологически активные точки, т. 5 [Электронный ресурс]. – М., 2015. – URL: <http://docplayer.ru/27519167-Neelektromagnitnye-polya-psihofizika-kniga-22-biologicheskii-aktivnye-tochki.html> (дата обращения: 25.03.2019).
3. *Кандаров Ф.Б.* Отечественная рефлексотерапия. – Уфа: Гилем, 2014. – 197 с.
4. *Будаговский А.В., Будаговская О.Н., Будаговский И.А.* Межклеточная коммуникация посредством когерентного излучения // Фотоника. – 2016. – № 3 (57). – С. 148–163.
5. *Navrotsky L.G., Lisitsyna L.I.* Biophysics model for information transmission path from an acupuncture point to central nervous system // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 44894 Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – Vol. 1, pt. 2. – P. 366–368.
6. Research on possibility of visualization of biologically active points by light illumination / L.G. Navrotsky, L.I. Lisitsyna, V.I. Yudin, S.V. Belavskaya, A.A. Blokhin, V.S. Rusetsky // 12th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 34006 Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – Vol. 1. – P. 524–526.
7. Patterns of skin luminescence resulting from the visualization of active acupuncture points using optical stimulation / L.G. Navrotsky, A.A. Blokhin, S.V. Belavskaya, L.I. Lisitsyna, A.A. Lyutkevich, E.L. Poteryaeva, V.I. Yudin, G. Litscher // Integrative Medicine International. – 2015. – Vol. 2, N 1–2. – P. 1–8.

8. Some actual problems of electronic instrument in the field of reflexotherapy / S.V. Belavskaya, A.A. Blokhin, A.N. Kuzmin, L.I. Lisitsyna, L.G. Navrotsky // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016): proceedings, Novosibirsk, 3–6 October 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Vol. 1, pt. 1. – P. 395–401.

9. Исследование возможности визуализации высокоактивных точек соответствия органам и участкам тела с патологией оптическим методом / Л.Г. Навроцкий, А.А. Блохин, С.В. Белавская, Л.И. Лисицына, А.А. Люткевич, Е.Л. Потеряева, В.И. Юдин // Медицина и образование в Сибири. – 2015. – № 2.

10. *Gevorgyan I.S., Blokhin A.A., Lisitsyna L.I.* Study of the patterns structure dependence in the area of biologically active points on different features // Science. Research. Pracrice: IInd All-Russia Academic and Research Conference of Graduate and Postgraduate Students. – Novosibirsk: NSTU, 2019. – С. 169–172.

11. Ultraviolet range waves in the spectrum of biologically active areas induced radiation / L.G. Navrotsky, L.I. Lisitsyna, S.V. Belavskaya, A.A. Blokhin, A.E. Kamardin, O.Y. Krasilnikova, N.S. Chirkova // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 44894 Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – Vol. 1, pt. 2. – P. 363–365.

12. *Самосюк И.З., Лысенюк В.П.* Акупунктура. – М.: АСТ-Пресс Книга, 2004. – 528 с. – (Медицинская энциклопедия).

13. *Атаев Д.И.* Электропунктурная рефлексотерапия: в помощь вашему здоровью. – М.: Амрита-Русь, 2004. – 224 с.

14. Разработка универсального комплекса для исследования и оценки электрофизических параметров кожного покрова малой площади и многофакторного физиотерапевтического воздействия: отчет НИОКР / Л.И. Лисицына, С.В. Белавская, А.Н. Кузьмин и др. – № ГР 01201463196; Инв. № 214120570016. – Новосибирск, 2014. – 47 с.

15. *Зельдин Е.А.* Импульсные газоразрядные лампы и их схемы включения. – М.: Энергия, 1964. – 51 с.

16. Цифровая фотокамера Nikon D3300. Подробное руководство пользователя. – Nikon Corporation, 2014. – 392 с.

17. Luminescence of acupuncture points in darkened area under optical pulse excitation of adjoining areas of investigated meridian / L.G. Navrotsky, L.I. Lisitsyna, A.A. Blokhin, A.E. Kamardin, S.V. Belavskaya, E.L. Poteryaeva // The 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM-2018: proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – P. 645–648.

18. Denkovi Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://denkovi.com/denkovi-software> (дата обращения: 25.03.2019).

Лисицына Лилия Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка медицинских устройств, исследование биофизических процессов в кожном покрове. Имеет более 500 научных публикаций, включая 39 авторских свидетельств и патентов РФ. E-mail: lisitcinali@gmail.com

Навроцкий Леонид Григорьевич, научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – разработка медицинских диагностических и терапевтических устройств. Имеет более 30 научных публикаций. E-mail: leonid.navrotsky@gmail.com.

Блохин Александр Александрович, ассистент кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы – медицинские устройства. Имеет более 30 научных публикаций и 7 наград за выступления на конференциях (дипломы и медали). E-mail: snakebss@mail.ru

Белавская Светлана Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка многофункциональных физиотерапевтических устройств с пространственным и временным совмещением воздействующих факторов. Имеет около 200 публикаций, включая 17 авторских свидетельств и патентов РФ. E-mail: BelavskayaSV@gmail.com

Камардин Александр Евгеньевич, аспирант кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы – медицинские устройства, программирование. Имеет 10 научных публикаций. E-mail: aekam4@gmail.com

Геворгян Ирина Сматовна, студентка кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы – медицинские приборы для диагностики и восстановительной медицины. Имеет 3 научные публикации. E-mail: ya.irinagevorgyan2013@yandex.ru

Чиркова Наталья Сергеевна, студентка кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы – медицинские приборы для диагностики и восстановительной медицины. Имеет 10 научных публикаций. E-mail: chns5694@gmail.com

Lisitsyna Liliya Ivanovna, D. Sc.(Eng.), professor, department of electronic devices, Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is development of medical devices and development of biophysical processes in the skin. She is the author of more than 500 publications including 39 RF author's certificates and patents. E-mail: lisitcinali@gmail.com

Navrotsky Leonid Grigorievich, a research associate at the Institute of Laser Physics SB RAS. His research interests are focused on development of medical diagnostic and therapeutic devices. He is the author of more than 30 publications. E-mail: leonid.navrotsky@gmail.com

Blokhin Alexander Alexandrovich, an assistant lecturer at the department of electronic devices in the Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is development of medical devices. He is the author of over 30 publications and has 7 awards (diplomas and medals) for presentations at conferences. E-mail: snakebss@mail.ru

Belavskaya Svetlana Vitalievna, PhD (Eng.), associate professor, department of electronic devices, Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is development of multifunctional physiotherapeutic devices with spatial and time combination of affecting factors. She is the author of more than 200 publications including 17 RF author's certificates and patents. E-mail: BelavskayaSV@gmail.com

Kamardin Alexander Evgenievich, a postgraduate student at the department of electronic devices in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on developing medical devices and programming. He has published 10 research papers. E-mail: aekam4@gmail.com

Gevorgyan Irina Smbatovna, a student, department of electronic devices, Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is development of medical devices for diagnostics and rehabilitation medicine. She is the author of 3 publications. E-mail: ya.irinagevorgyan2013@yandex.ru

Chirkova Natalia Sergeevna, a student, department of electronic devices, Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is development of medical devices for diagnostics and rehabilitation medicine. She is the author of 10 publications. E-mail: chns5694@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-61-76

A Specialized Installation for Studying Biophysical Processes Occurring in the SkinL.I. LISITSINA^{1,a}, L.G. NAVROTSKY^{2,b}, A.A. BLOKHIN^{1,c}, A.E. KAMARDIN^{1,d},
S.V. BELAVSKAYA^{1,e}, I.S. GEVORGYAN^{1,f}, N.S. CHIRKOVA^{1,g}¹ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation² Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Academician Lavrentyev Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russian Federation^a lisitcinali@gmail.com ^b leonid.navrotsky@gmail.com ^c snakebss@mail.ru^d BelavskayaSV@gmail.com ^e aekam4@gmail.com^f ya.irinagevoryan2013@yandex.ru ^g chns5694@gmail.com**Abstract**

The possibility to study biophysical processes in the skin on the basis of forced glow patterns is proved.

A specialized software installation intended for investigations of biophysical processes in the skin was developed. The availability of a node of the excitation and registration of luminescence of skin is its main feature. Experiments on the study of some biophysical processes occurring in the skin, in particular, the efficiency of the installation was tested on the process of identifying the causes of differences in the structures of the patterns of the glow of skin in the area of acupuncture points (AP). The results of preliminary studies conducted on the meridians of the lungs, heart, pericardium, kidneys, colon, three heaters and stomach are presented. It is found that the dependence of the structure of the luminescence patterns on the external conditions and characteristics of the subject is negligible. It is also shown that one of the possible reasons for the difference in the structures of the glow patterns of skin is the AP – type of meridian. But, perhaps, this is not the only reason, since in the data obtained earlier, some variation was observed in the types of luminescence patterns in the AP region located on a certain meridian of the skin. A previous conclusion that AP glows when optically exposed, if the points are on the active meridian or on the meridian responsible for the organ with pathology was confirmed. In order to obtain more reliable results and to find the connection between the structure type and the environment parameters, the characteristics of the subjects themselves as well as the activity of the meridian, it is necessary to continue the research and to gain more extensive statistics. The conducted experiments have confirmed the suitability of the developed specialized installation for studying biophysical processes occurring in the skin.

Keywords: installation specialized, excitation and registration of luminescence, node, skin, biophysical processes, research, meridians, structures of glow patterns

REFERENCES

1. Portnov F.G. *Elektropunktornaya* refleksoterapiya [Electropunctural reflexotherapy]. 3rd ed. Riga, Zinatne Publ., 1987. 352 p.
2. Koltovoi N.A. *Neelektromagnitnye polya. Psikhofizika*. Kn. 22. *Biologicheski aktivnye tochki*, t. 5 [Not electromagnetic fields. Psychophysics. Bk. 22. Biologically active points. Vol. 5]. Moscow, 2015. Available at: <http://docplayer.ru/27519167-Neelektromagnitnye-polya-psihofizika-kniga-22-biologicheski-aktivnye-tochki.html> (accessed: 25.03.2019).
3. Kandarov F.B. *Otechestvennaya refleksoterapiya* [Domestic reflexology]. Ufa, Gilem Publ., 2014. 197 p.
4. Budagovsky A.V., Budagovskaya O.N., Budagovsky I.A. *Mezhkлетchnaya kommunikatsiya posredstvom kogerentnogo izlucheniya* [Intercellular communication using coherent radiation]. *Fotonika – Photonics*, 2016, no. 3 (57), pp. 148–162.
5. Navrotsky L.G., Lisitsyna L.I. Biophysics model for information transmission path from an acupuncture point to central nervous system. *14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894 Proceedings*, Novosibirsk, 2018, vol. 1, pt. 2, pp. 366–368.
6. Navrotsky L.G., Lisitsina L.I., Yudin V.I., Belavskaya S.V., Blokhin A.A., Rusetsky V.S. Research on possibility of visualization of biologically active points by light illumination. *12th Inter-*

* Received 06 September 2018.

national Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 34006 Proceedings, Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 524–526.

7. Navrotsky L.G., Blokhin A.A., Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Lyutkevich A.A., Poteryaeva E.L., Yudin V.I., Litscher G. Patterns of skin luminescence resulting from the visualization of active acupuncture points using optical stimulation. *Integrative Medicine International*, 2015, vol. 2, no. 1–2, pp. 1–8.

8. Belavskaya S.V., Blokhin A.A., Kuzmin A.N., Lisitsyna L.I., Navrotsky L.G. Some actual problems of electronic instrument in the field of reflexotherapy. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2016): proceedings*, Novosibirsk, 3–6 October 2016, vol. 1, pt. 1, pp. 395–401.

9. Navrotsky L.G., Blokhin A.A., Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Lyutkevich A.A., Poteryaeva E.L., Yudin V.I. Issledovanie vozmozhnosti vizualizatsii vysokoaktivnykh tochek sootvetstviya organam i uchastkam tela s patologiei opticheskim metodom [Research on possibility of visualization of highly active points of compliance to organs and body regions with pathology by the optical method]. *Meditsina i obrazovanie v Sibiri – Medicine and education in Siberia*, 2015, no. 2.

10. Gevorgyan I.S., Blokhin A.A., Lisitsyna L.I. Study of the patterns structure dependence in the area of biologically active points on different features. *Science. Research. Practice: 17th All Russia Academic and Research Conference of Graduate and Postgraduate Students*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019, pp. 169–172.

11. Navrotsky L.G., Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Blokhin A.A., Kamardin A.E., Krasilnikova O.Y., Chirkova N.S. Ultraviolet range waves in the spectrum of biologically active areas induced radiation. *14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894 Proceedings*, Novosibirsk, 2018, vol. 1, pt. 2, pp. 363–365.

12. Samosyuk I.Z., Lysenyuk V.P. *Akupunktura* [Acupuncture]. Moscow, AST-Press Kniga Publ., 2004. 528 p.

13. Ataev D.I. *Elektropunktornaya refleksoterapiya: v pomoshch' vashemu zdorov'yu* [Elektropunktornaya reflexotherapy: for the aid to your health]. Moscow, Amrita- Rus' Publ., 2004. 224 p.

14. Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Kuzmin A.N., et al. *Razrabotka universal'nogo kompleksa dlya issledovaniya i otsenki elektrofizicheskikh parametrov kozhnogo pokrova maloi ploschadi i mnogofaktornogo fizioterapevticheskogo vozdeistviya: otchet NIOKR* [Development of a universal complex for a research and assessment of electrophysical parameters of an integument of the small area and multiple-factor physiotherapeutic influence: Research and development]. Novosibirsk, 2014, no. 01201463196 (In Russian, unpublished).

15. Zel'din E.A. *Impul'snye gazorazryadnye lampy i ikh skhemy vklyucheniya* [The pulsed gas discharge lamp and circuit]. Moscow, Energiya Publ., 1964. 51 p.

16. *Tsifrovaya fotokamera Nikon D3300. Podrobnoe rukovodstvo pol'zovatelya* [Digital camera Nikon D3300. Detailed user guide]. Nikon Corporation, 2014. 392 p.

17. Navrotsky L.G., Lisitsyna L.I., Blokhin A.A., Kamardin A.E., Belavskaya S.V., Poteryaeva E.L. Luminescence of acupuncture points in darkened area under optical pulse excitation of adjoining areas of investigated meridian. *The 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM-2018: proceedings*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018, pp. 645–648.

18. *Denkovi Software*. Available at: <https://denkovi.com/denkovi-software> (accessed 25.03.2019).

Для цитирования:

Специализированная установка для исследования биофизических процессов, протекающих в кожном покрове / Л.И. Лисицына, Л.Г. Навроцкий, А.А. Блохин, С.В. Белавская, А.Е. Камардин, И.С. Геворгян, Н.С. Чиркова // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 61–76. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-61-76.

For citation:

Lisitsyna L.I., Navrotsky L.G., Blokhin A.A., Kamardin A.E., Belavskaya S.V., Gevorgyan I.S., Chirkova N.S. Spetsializirovannaya ustanovka dlya issledovaniya biofizicheskikh protsessov, protekayushchikh v kozhnom pokrove [Specialized installation for the study of biophysical processes occurring in the skin]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 61–76. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-61-76.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 621.311

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-77-90

Средства и способы управления параллельной работой электрической станции малой генерации с электрической сетью*

А.И. МАРЧЕНКО^а, В.В. ДЕНИСОВ^б, И.С. МУРАШКИНА^с

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

^а andrey1991@ngs.ru ^б wden@ngs.ru ^с murashkinainna@yandex.ru

Актуальность темы обусловлена ростом количества объектов малой распределенной генерации и стремлением их подключения на параллельную работу к электрической распределительной сети электроэнергетической системы преимущественно низкого класса напряжения.

В настоящей работе проведен анализ тенденций развития современных технических решений для управления параллельной работой малой генерации с электрической сетью.

Авторы представили результаты как теоретических (анализ средств и способов управления), так и экспериментальных исследований возможности и эффективности подключения малой распределенной генерации к электрической сети на параллельную работу.

Разработка управляемого интеллектуального соединения, которое позволит синхронно подключать автономные системы энергоснабжения к единой энергосистеме и отключать их при нарушении режимных параметров, является одним из перспективных трендов развития электроэнергетики будущего. Решение данной технической задачи необходимо и предусматривается в России в рамках Национально-технологической инициативы и дорожной карты «Энерджинет». Одним из таких решений является предлагаемая автоматика управления параллельной работы локальной системы электроснабжения с внешней электрической сетью.

На кафедре автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета с участием авторов разработана и испытана на физической модели инновационная автоматика управления режимом параллельной работы электростанций малой мощности с внешней электрической сетью энергосистемы, реализованная на предложенном и запатентованном способе опережающего сбалансированного деления генераторов. Исследованы возможности ее применения в электрической сети.

Научная новизна заключается в исследовании эффективности средств и способов управления параллельной работой малой генерации в электрической сети.

Ключевые слова: малая синхронная генерация, автономная работа, параллельная работа с сетью, управление, автоматика, испытания

* Статья получена 22 сентября 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Современные сети SmartGrid и энергосистемы должны удовлетворять требованиям энергоэффективного и экономичного функционирования. Новый качественный уровень функционирования возможен за счет скоординированного управления, развития коммерческих и технологических взаимодействий между субъектами и системами управления электрических сетей, электрических станций большой мощности, распределенной малой генерацией и активными потребителями.

В понятие малой генерации входят генерирующие установки малой мощности, подключаемые к распределительной электрической сети на напряжение 0,4...35 кВ, использующие источники первичной энергии различных видов [1, 2]. В зарубежной литературе распределенная малая генерация понимается как «распределенная» генерация (Distributedgeneration) или «распределенная» генерация (Dispersedgeneration), «включенная» (Embeddedgeneration), а также «виртуальная электростанция» (Virtualpowerplant) – группа распределенных генераторов, находящихся под единым автоматизированным управлением [3].

Установки распределенной генерации классифицируют по установленной мощности единичного генерирующего оборудования, находящегося в пределах от нескольких киловатт до 100 МВт, а также по классам напряжения электрической сети, режиму работы и схемам выдачи мощности.

В России распределенная генерация в основном выражена синхронной генерацией на топливе различных видов, когенерацией, малыми гидроэлектростанциями мощностью не более 25 МВт, а также автономно работающими локальными энергетическими системами.

Рост количества распределенной генерации в электроэнергетической системе не только имеет положительные стороны, но и создает определенные технические трудности, связанные с изменением схемно-режимных свойств энергосистемы, возможностями управления ими в нормальных и аварийных режимах. При подключении энергоблоков объектов малой генерации изменяются потокораспределение в прилегающем районе электрической сети и условия регулирования напряжения, происходит снижение потерь при передаче электроэнергии, разгрузка распределительной сети и, следовательно, увеличение ее пропускной способности.

Распределенная малая генерация при параллельной работе усложняет задачи управления режимами централизованной энергосистемы в связи с чувствительностью малоинерционных генерирующих установок к внешним воздействиям и, как следствие, их частому отключению, но при этом данный источник генерации позволяет повысить надежность и независимость энергоснабжения присоединенного потребителя [4, 5].

Распределительная сеть с появлением в ней малой генерации приобретает свойства основной сети и становится локальной энергосистемой, для которой необходимо решение тех же задач, что и для большой энергосистемы, по обеспечению надежного и безопасного функционирования [6, 7].

На сегодняшний день большинство установок малой распределенной генерации работает в автономных режимах, поскольку присоединение к существующим электрическим сетям встречает технические, экономические и административные барьеры.

1. ПОНЯТИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ

К технологиям распределенной генерации (распределенных энергоресурсов, Distributed Energy Resources) в мировой практике относят широкий спектр технических решений и сервисов, например [3]:

- распределенную генерацию (Distributed Generation);
- управление спросом (Demand Response);
- управление энергоэффективностью;
- микрогрид системы;
- распределенные системы хранения электроэнергии;
- электромобили.

Базовое свойство всех этих технологий – близость к конечному потребителю энергии.

Под распределенной малой генерацией будем понимать совокупность электростанций, расположенных близко к месту потребления энергии и подключенных непосредственно к потребителю либо к распределительной электрической сети (в случае, когда потребителей несколько). Тип используемого электростанцией источника первичной энергии (например, органическое топливо или возобновляемая природная энергия), как и принадлежность ее к потребителю, генерирующей или сетевой компании, или третьему лицу, не имеет значения.

В зарубежной практике есть тенденция ограничивать мощность электростанций распределенной малой генерацией верхним уровнем в зависимости от применяемой технологии. Например, исследовательская и консалтинговая компания Navigant Research в своей практике использует границу 500 кВт для ветряных, 1 МВт – для солнечных, 250 кВт – для газотурбинных и 6 МВт – для газопоршневых и дизельных электростанций. Европейский исследовательский проект партнерства в распределенной энергетике EU-DEEP использовал похожие границы: тепловые электростанции (паровые и газовые турбины, поршневые двигатели) – до 10 МВт, микротурбины – до 500 кВт, ветряные станции – 6 МВт и солнечные – до 5 МВт.

В российской практике единого мнения по этому поводу нет, как и нет ограничений в нормативных документах. Иногда используется общая для всех технологий граница деления по величине установленной мощности единичного энергоблока в 25 МВт, которая «разделяет» электростанции, работающие на розничном и оптовом рынках электроэнергии и мощности.

На базе развития и внедрения распределенной малой генерации формируются микрогрид-системы – объединенная энергосистема, состоящая из распределенных энергоресурсов и нескольких электрических нагрузок (потребителей), работающая как единый управляемый объект параллельно и вместе с существующей электрической сетью или в островном режиме.

Малая распределенная генерация направлена на решение локальных проблем основной энергетики, возникающих из-за «запертости» и недостаточности электрических мощностей и отсутствия их резервирования, когда строительство генерирующих производств малой мощности является экономически более эффективным, чем реконструкция и строительство электрораспределительных сетей.

Вследствие небольших мощностей энергоблока устанавливаются в распределительной сети в непосредственной близости от потребителей, формируя распределенную генерацию и микрогрид-системы, которые разгружают электрические сети, что способствует повышению надежности и качества

электроэнергии [8, 9] и дает дополнительные возможности для реализации электроэнергии и развития прилегающей территории.

Перспективным является развитие технологий на основе Российской национальной концепции SmartGrid, отличающейся от принятой в странах Европы, США и др.

Развитие распределенной малой генерации за границей происходит преимущественно на базе возобновляемых источников энергии, работающих в электрической сети режимно-изолированно, либо через частотно-преобразовательные устройства (вставки постоянного тока).

В России с ее климатическими и географическими особенностями речь идет о создании интеллектуальной автоматики и систем управления преимущественно для когенерационных установок топливной распределенной малой генерации. Энергоблоки, работая синхронно с общей распределительной электрической сетью единой энергосистемы, на основе системы автоматизированного интеллектуального управления позволяют полноценно использовать системные эффекты от совместного функционирования и синхронной работы крупной концентрированной и малой распределенной генерации.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Рассмотрим технические решения, обеспечивающие режим параллельной работы объединяемых синхронных генераторов малой генерации в Автономной системе электроснабжения (АСЭ) и в сети Единой электроэнергетической системы.

1) Работа АСЭ на базе синхронной малой генерации (СМГ) в островном режиме.

Источниками являются энергоблоки с синхронными генераторами. По критерию надежности ($n - 1$) необходим дополнительный генератор, а с учетом ремонтных работ – два генератора. Для запуска станции с нуля необходим резервный дизель-генератор. Достоинство – независимость от внешнего энергоснабжения. Недостатки: высокие затраты на надежность, необходимость регулирования режима и противоаварийного управления в полном объеме, низкое использование установленных мощностей.

2) Работа АСЭ на базе СМГ с накопителем и преобразователем.

Для выравнивания графика нагрузки, регулирования напряжения и кратковременного резервирования используется накопитель энергии (аккумуляторная батарея) с преобразователем. Достоинства: независимость, кратковременное резервирование от батареи, возможность использования генератора на постоянных магнитах и асинхронного генератора, возможность высокого использования мощности генераторов. Недостатки: высокие затраты на батарею и преобразователь, необходимость регулирования режима в полном объеме, искажение формы синусоиды (появление высших гармоник в собственной сети), дополнительные потери при накоплении и преобразовании энергии.

3) Работа АСЭ на базе СМГ в островном режиме с автоматическим вводом резерва от сети при погашении электростанции.

Параллельная работа электростанции с внешней сетью не предусматривается. Надежность электроснабжения потребителей обеспечивается автоматическим вводом резерва от внешней сети. Достоинство – обеспеченная

надежность при наличии сетевого резерва в требуемом объеме. Недостатки: необходимость регулирования режима и противоаварийного управления в полном объеме и низкое использование установленных мощностей.

4) Присоединение к электрической сети АСЭ с асинхронным генератором.

Использование асинхронных генераторов в энергоблоках станции. Достоинство – возможность выдачи избытков мощности и энергии во внешнюю электрическую сеть. Недостатки: надежность и качество электрической энергии определяются внешней сетью, подпитка коротких замыканий токами от внешней сети, невозможность автономной работы при нарушениях во внешней сети или связи с ней.

5) Присоединение к электрической сети АСЭ с асинхронным генератором и накопителем энергии.

Использование асинхронных генераторов в энергоблоках станции в сочетании с накопителями и преобразователями. Достоинства: обеспеченная надежность электроснабжения потребителей, возможность высокого использования мощности генераторов, меньшая потребность в сетевом резерве. Недостатки: высокие затраты на батарею и преобразователь, искажение формы синусоиды, в том числе появление гармоник во внешней сети, подпитка коротких замыканий токами от внешней сети, дополнительные потери при накоплении и преобразовании энергии.

6) Присоединение к электрической сети АСЭ на базе синхронной малой генерации через вставку постоянного тока.

Использование несинхронной связи на базе вставки постоянного тока. Достоинства: обеспеченная надежность электроснабжения потребителей и работы электростанции, возможность выдачи избытков мощности и энергии в сеть. При этом данное решение обладает существенными недостатками: высокие затраты на преобразовательную вставку, искажение формы синусоиды, дополнительные потери мощности и энергии.

7) Присоединение к электрической сети АСЭ на базе синхронной малой генерации через электромеханическую вставку.

Использование несинхронной связи на базе асинхронизированного электромеханического преобразователя частоты. Достоинства: обеспеченная надежность электроснабжения и работы электростанции, возможность выдачи избытков мощности и энергии в сеть. Недостатки: высокие затраты на преобразовательную вставку, дополнительные потери мощности и энергии.

8) Присоединение к электрической сети АСЭ на базе синхронной малой генерации с использованием обычной противоаварийной автоматики.

Использование традиционного комплекса автоматики для обеспечения безопасной и надежной работы энергоузла с электростанцией в составе энергосистемы. Достоинства: обеспеченная надежность электроснабжения потребителей и работы электростанции, возможность выдачи избытков мощности и энергии в сеть, повышение качества электрической энергии в районе присоединения станции к сети за счет автоматического регулирования возбуждения (АРВ) генератора. Недостатки: рост отключаемых токов короткого замыкания в сети АСЭ и внешней сети, возможность нарушения синхронности параллельной работы, возможность возникновения недопустимых ударных моментов на валах синхронных генераторов с повреждением энергоблоков, взаимное влияние АСЭ и внешней сети на работу релейных защит и необходимость их согласования, дополнительные затраты на реконструкцию суще-

ствующей автоматики и дооснащение дополнительной, необходимость интеграции системы управления АСЭ в систему объединенного диспетчерского управления внешней сети, дополнительные затраты на оснащение автоматикой управления режимом параллельной работы.

9) Присоединение к электрической сети АСЭ на базе синхронной малой генерации с использованием автоматики опережающего сбалансированного деления сети и автооператора.

Использование автоматики опережающего сбалансированного деления сети при нарушениях нормального режима и автооператора для автоматического восстановления нормального режима и осуществления режимного управления. Основные достоинства технического решения: обеспеченная надежность электроснабжения потребителей и работы электростанции, возможность выдачи избытков мощности и энергии в сеть, повышение качества электрической энергии в районе присоединения станции к сети за счет АРВ генератора. Недостатки незначительные и заключаются только в дополнительных затратах на оснащение предлагаемой специальной автоматикой.

10) Объединение АСЭ на базе синхронной малой генерации в малые изолированно работающие энергосистемы.

Создание изолированно работающих энергосистем на базе АСЭ. Достоинства: обеспеченная надежность электроснабжения потребителей и работы электростанции, возможность обмена избытками мощности и энергии в сети, повышение качества электроэнергии за счет системного регулирования и выравнивания суммарного графика нагрузки. Недостатки: дополнительные затраты на создание системообразующей сети, оснащение системной автоматикой.

Из рассмотренных вариантов следует выделить *новый способ управления режимом параллельной работы СМГ в сети, использующий опережающее сбалансированное ее отделение от внешней сети при нарушении условий нормальной параллельной работы*, далее он и будет рассмотрен в реализации для автоматики.

3. АВТОМАТИКА УПРАВЛЕНИЯ «МИНИГРИД» С «БЕСПИЛОТНОЙ» ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Предлагается новое техническое решение и способ управления [10]:

- для снижения отключаемых токов короткого замыкания;
- предотвращения нарушений устойчивости параллельной работы с возникновением асинхронных режимов и для возникновения недопустимых динамических моментов на валах синхронных генераторов и асинхронных режимов;
- снижения мощности отключаемых нагрузок;
- исключения необходимости согласования защит внешней сети с защитами и автоматикой присоединяемой сети малой генерации [11].

Разработанная на кафедре автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ автоматика является режимно-противоаварийной, а также автоматическим оператором изменений структуры системы, включая разделение автономной системы электроснабжения на части, их объединение между собой и с сетью внешней энергосистемы [12, 13]. Таким образом, является автоматикой полного цикла управления автономной системой энергоснабжения в нормальных и аварийных условиях работы.

Безопасная работа объединяемых на параллельную работу синхронных генераторов автономной системы энергоснабжения и внешней электрической сети обеспечивается за счет опережающего сбалансированного отключения всей автономной системы энергоснабжения или ее части от внешней сети при возникновении нарушений нормального режима системы. При восстановлении условий для нормальной работы производится автоматическое восстановление нормального режима [14, 15].

Автоматика управления режимом параллельной работы автономной системы энергоснабжения с внешней электрической сетью подразделяется на технологическую (ТА) и противоаварийную (ПА). К последней относится и автоматическое опережающее сбалансированное деление (АОСД). Автоматика выполнена резервированной. Кроме того, резервная автоматика выполняет основную функцию резервирования, функцию резервирования отказа выключателя устройства, осуществляющего деление по второму штатному сечению.

Основными функциями ПА являются блокировка возникновения недопустимых коммутационных состояний сети, сбалансированное деление сети малой электрической станции и региональной электрической системы при внутренних и внешних коротких замыканиях. Для блокировки используются данные о топологии сети имеющейся автоматизированной системы управления технологическими процессами, а для деления – системой измерения напряжения прямой и обратной последовательностей на шинах распределительного пункта тепловой электрической станции. При снижении напряжения прямой последовательности ниже уставки или возникновении напряжения обратной последовательности выше уставки выдается сигнал на деление сети.

Деление сети происходит не более чем за 0,1 секунды, что позволяет исключить недопустимое влияние аварийного режима при параллельной работе на оборудование и необходимость его модернизации/замены. Срабатывание АОСД определяется уставками по напряжению прямой и обратной последовательностей напряжения (измерение в каждом полупериоде промышленной частоты с периодичностью 10 мс) в некотором контрольном узле сети (на шинах распределительного пункта с выключателями, используемыми для деления) исходя из основных условий:

1) уставка по напряжению прямой последовательности должна быть ниже (отстраивается от) максимальных снижений напряжения прямой последовательности при нормальном оперировании сетью (режимных изменений напряжения, изменении напряжения при коммутациях нагрузки и энергоблоков в сети 10 кВ подстанции примыкания);

2) уставка по напряжению прямой последовательности должна быть выше остаточного напряжения при отключении питающей силовой подстанции примыкания линий 110 кВ при ложном срабатывании их защит или отключении резервными защитами;

3) уставка по напряжению прямой последовательности должна быть выше допустимого снижения напряжения прямой последовательности (по условию вероятного возникновения недопустимых динамических моментов на валах синхронных генераторов энергоблока – около 0,65 номинального значения), а уставка по напряжению обратной последовательности ниже уставки срабатывания защиты от напряжения обратной последовательности генераторов энергоблока при одно-, двух- и трехфазных коротких замыкани-

ях в сети 110 кВ; двух- и трехфазных коротких замыканиях в сети 10 кВ продолжительностью более 0,1 секунды.

Одной из основных технологических функций автоматики является также способность к синхронизации генераторов между собой и с внешней электрической сетью энергосистемы.

Схема экспериментальной установки, моделирующей работу локальной системы электроснабжения на базе малой генерации присоединенной на параллельную работу к силовой подстанции 110/10 кВ распределительной сети электроэнергетической системы Новосибирской области (ПС ЭЭС), с учетом топологического расположения элементов на наборном поле электродинамической модели (ЭДМ) электроэнергетических систем Центра коллективного пользования «Центр испытаний устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем» НГТУ представлена на рис. 1.

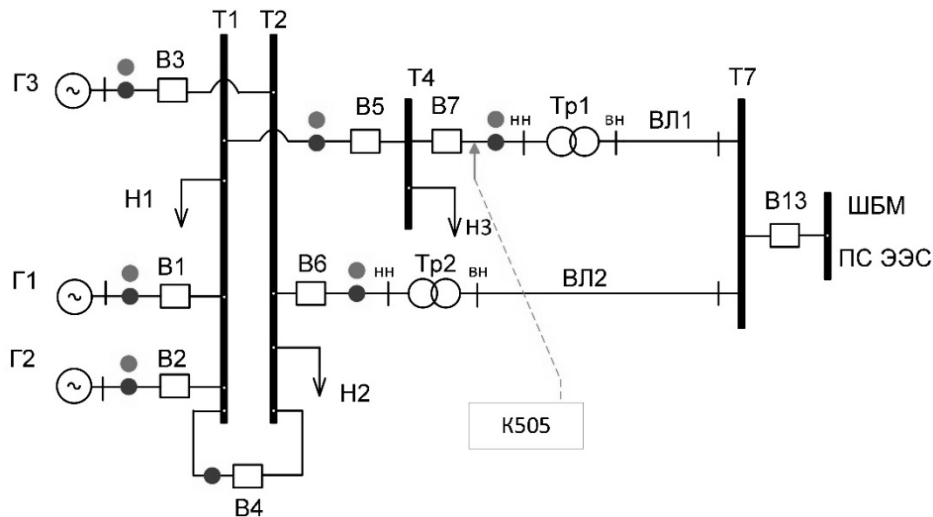


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, моделирующей работу СМГ с электрической сетью, с учетом топологического расположения элементов на наборном поле ЭДМ

Fig. 1. A diagram of the experimental setup that simulates the operation of the SMG with the electrical network taking into account the topological arrangement of elements on the EDM dial pad

На рис. 1 Г1–Г3 – генераторы; Н1, Н2; В1–В7, В13; Т1, Т2, Т4, Т7; Тр1, Тр2 – трансформаторы; нн, вн – низкое и высокое напряжение; ВЛ1, ВЛ2 – воздушная линия; ШБМ – шины бесконечной мощности; К505 – измерительный комплект тока напряжения и мощности.

Внешний вид стойки автоматики АОСД показан на рис. 2. На рис. 3 представлена осциллограмма процесса синхронизации генераторов Г1 с Г2 при активном поведении Г1 и пассивной роли Г2. Осциллографирование процессов осуществляли системой регистрации – внутренним осциллографом автоматизированного рабочего места стойки АОСД.

На рис. 3 $f_{Г1}, f_{Г2}$ – частота генераторов Г1, Г2; $U_{Г1}, U_{Г2}$ – напряжение генераторов Г1, Г2; $P_{Г1}, Q_{Г1}$ – активная и реактивная мощность генератора Г1; $\delta_{Г1/Г2}$ – взаимный угол ротора генератора Г1 относительно ротора генератора Г2.



Рис. 2. Опытный образец автоматики управления режимами электростанции малой генерации

Fig. 2. A prototype of automatic control of low-generation power station modes

Из рис. 3 следует: до синхронизации генераторы находились в режиме холостого хода, после автоматической работы и выдачи управляющих воздействий, синхронизации Г1 и Г2 происходит их совместная параллельная и синхронная работа на общую нагрузку.

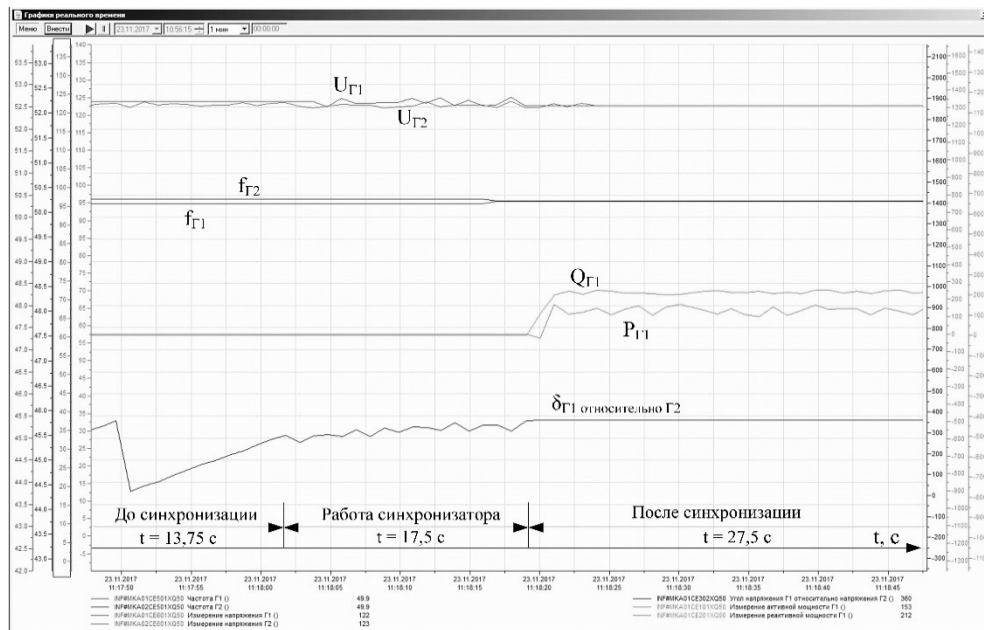


Рис. 3. Осциллограмма процесса при синхронизации Г1 и Г2 между собой при включенных регуляторах АРВ (возбуждения) и АРС (скорости) на Г1 и Г2 (измерение параметров на генераторе Г1) с записью процесса регистратором стойки автоматики

Fig. 3. An oscillogram of the process during synchronization of G1 and G2 with each other with enabled regulators AEC (excitation) and ASC (speed) on G1 and G2 (measurement of parameters on the generator G1) with recording of the process by the recorder of the automation stand

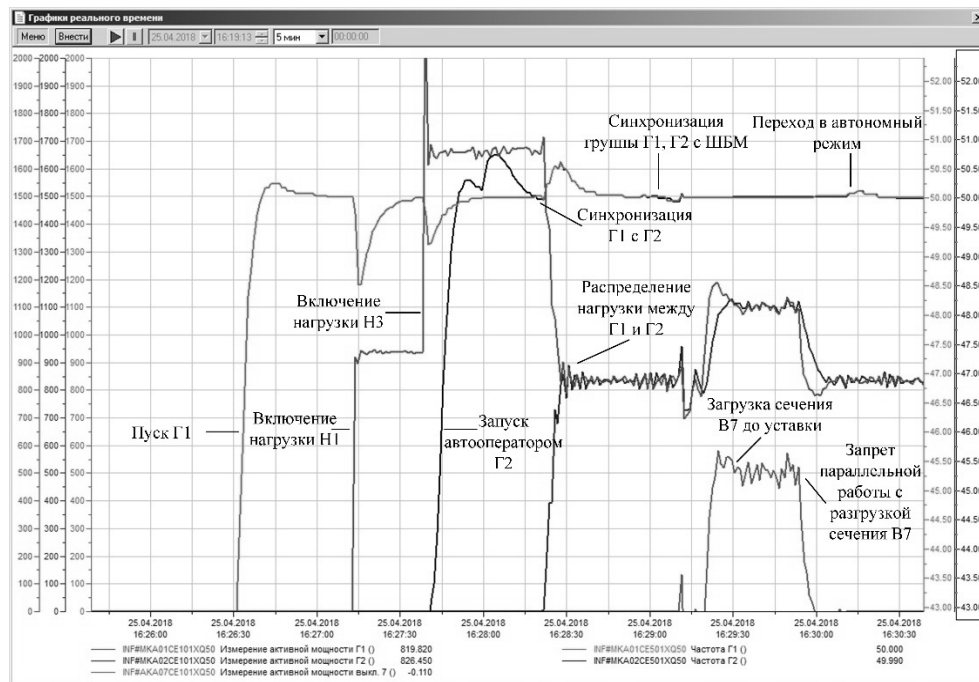


Рис. 4. Переходный процесс при запуске генератора Г1, набросе нагрузки, вводе Г2 для разгрузки Г1, синхронизации Г1 и Г2 с шинами бесконечной мощности (переход к режиму параллельной работы), запрете параллельной работы с разгрузкой сечения по выключателю В7 и отделением Г1 и Г2 от шин бесконечной мощности (переход в автономный режим) под управлением автоматики с автооператором

Fig. 4. Transition when starting the generator G1, loading-on, entering G2 for unloading G1, synchronizing G1, G2 with buses of infinite power (switching to a parallel operation mode), prohibiting parallel operation with unloading section through switch B7 and separation G1, G2 from buses of infinite power (switching to an autonomous mode) under automation control with an auto-operator

На рис. 4 представлена характерная осциллограмма процессов при возмущениях режима локальной системы энергоснабжения, работающей параллельно с внешней электрической сетью энергосистемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрен инновационный способ, предназначенный для реализации прямого включения объектов с малой (синхронной) генерацией в электрические сети посредством синхронных связей с применением специальной автоматики (виртуального роутера). Способ обеспечивает ограничение токов короткого замыкания, токов замыкания на землю, предотвращение нарушений устойчивости параллельной работы с возникновением асинхронных режимов, исключение ударных моментов на валах синхронных машин, исключение необходимости согласования защит внешней сети с защитами и автоматикой присоединяемой сети с электростанцией.

2. Автоматика, разработанная в НГТУ, является режимно-противоаварийной, а также автоматическим оператором изменений структуры системы,

включая разделение автономной системы электроснабжения на части, их объединение между собой и с сетью внешней энергосистемы. Безопасная работа обеспечивается за счет опережающего сбалансированного отделения всей автономной системы энергоснабжения или ее части от внешней сети при возникновении нарушений нормального режима системы. При восстановлении условий для нормальной работы производится автоматическое восстановление нормального режима ее работы.

3. Из анализа переходных процессов можно сделать вывод о работоспособности автоматики, а именно запуске энергоблоков, наборе нагрузки, автоматической синхронизации генераторов между собой и с сетью, поддержании необходимого перетока при выдаче мощности в сеть энергосистемы, а при автономной работе – о поддержании частоты в отделившейся части локальной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухгольц Б.М., Стычински З.А. Smart Grids – основы и технологии энергосистем будущего: пер. с англ. / под общ. ред. Н.И. Воропая ; науч. ред. пер. Ю.В. Шаров, П.Ю. Коваленко, К.А. Осинцев. – М.: Изд. дом МЭИ, 2017. – 461 с.
2. Фишов А.Г., Ландман А.К., Сердюков О.В. SMART технологии для подключения к электрическим сетям и управления режимами малой генерации // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 2–6 октября 2017 г. – Самара, 2017. – Т. 1. – С. 27–34.
3. Распределенная энергетика в России: потенциал развития / А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселов, Д. Холкин, К. Дацко. – М.: Энергетический центр Московской школы управления Сколково, 2018.
4. Mukatov B.B., Fishov A.G. Disintegration of power grid as part of the task of increasing functionality of electric system // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 25: Methodological problems in reliability study of large energy systems (RSES 2017), Kyrgyzstan, Bishkek. – P. 03009. – DOI: 10.1051/e3sconf/20172503009.
5. Мукатов Б.Б., Фишов А.Г. Дезинтеграция электрической сети в задаче повышения функциональности энергосистемы // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Иркутск, 2017. – Вып. 68: Исследование и обеспечение надежности систем энергетики. – С. 505–514.
6. Анализ общих технических требований к распределенным источникам энергии при их интеграции в энергосистему / Ю.Н. Кучеров, П.К. Березовский, Ф.В. Веселов, П.В. Илюшин // Электрические станции. – 2016. – № 3 (1016). – С. 2–10.
7. Ilyushin P.V., Sukhanov O.A. The structure of emergency-management systems of distribution networks in large cities // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85, N 3. – P. 133–137.
8. Fishov A., Marchenko A. The impact of distributed generation on power quality of the electric network // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – P. 248–254. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.248.
9. Fishov A.G., Marchenko A.I. Synchronized mode operation of distributed generation in power grid // The 12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017): proceedings, Korea, Ulsan, 31 May – 2 June 2017. – Ulsan, 2017. – Vol. 1. – P. 276–280.
10. Патент 2662728 Российская Федерация. Способ противоаварийного управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях / А.И. Марченко, Б.Б. Мукатов, А.Г. Фишов. – № 2016147843; заявл. 06.12.2016; опубл. 30.07.2018, Бюл. № 22.
11. СТО 59012820.29.240.001–2011. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования. – М.: ОАО «СО ЕЭС», 2011.
12. Фишов А.Г., Марченко А.И. Автоматика опережающего деления в схемах присоединения малой генерации к электрической сети // Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2017. – № 5. – С. 8–18.

13. Системная автоматика для интеграции локальных систем электроснабжения с синхронной малой генерацией в электрические сети / Е.Н. Гежа, В.Е. Глазырин, Г.В. Глазырин, Е.С. Ивкин, А.И. Марченко, Р.Ю. Семендяев, О.В. Сердюков, А.Г. Фишов // Релейщик. – 2018. – № 2. – С. 24–31.

14. Automation of unmanned low capacity power plant with synchronized generation / A.G. Fishov, A.I. Marchenko, I.S. Murashkina, E. Erdenebat, Y.S. Ivkin // Актуальные проблемы электронного приборостроения: труды XIV Международной научно-технической конференции АПЭП-2018, Новосибирск, 2–6 октября 2018 г.: в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 5. – С. 108–114. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545916.

15. *Fishov A.G., Semendyaev R.Y., Ivkin E.* Reconfiguration of the electric grid, regulators and modes control of the "unmanned power station" of low power at parallel operation with an external grid // The 13th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2018): proceedings, Harbin, China, 30 May – 1 June, 2018. – Harbin, 2018. – P. 898–901.

Марченко Андрей Иванович, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследования и разработка автоматика систем электроснабжения с малой распределенной генерацией, работающей параллельно с электрической сетью. Имеет более 25 публикаций. E-mail: andrey1991@ngs.ru

Денисов Виктор Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – автоматизация управления режимами энергообъектов и энергосистеме. Имеет более 120 публикаций. E-mail: wden@ngs.ru

Мурашкина Инна Сергеевна, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование условий и режимов работы электронных генераторов в электрической сети. Имеет семь публикаций. E-mail: murashkinainna@yandex.ru

Marchenko Andrei Ivanovich, a postgraduate student at the department of automated electric power systems at the power engineering faculty in the Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is study and design of automated power supply systems of small distributed generation operating parallel with the electric grid. He has published 25 research papers. E-mail: andrey1991@ngs.ru

Denisov Victor Vladimirovich, PhD (Eng.), an associate professor at the department of automated electric power systems at the power engineering faculty in the Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is automation of power unit control modes in the power grid. He is the author of over 120 publications. E-mail: wden@ngs.ru

Murashkina Inna Sergeevna, postgraduate student at the department of automated electric power systems at the power engineering faculty in the Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is study of conditions and modes of electronic generators in the electrical grid. She is the author of 7 publications. E-mail: murashkinainna@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-77-90

Control modes of synchronized operation of a low capacity power plant with an electric network*A.I. MARCHENKO^a, V.V. DENISOV^b, I.S. MURASHKINA^c

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

^a andrey1991@ngs.ru ^b wden@ngs.ru ^c murashkinainna@yandex.ru**Abstract**

The relevance of the topic is caused by an increasing number of facilities with low capacity distributed generation and by the tendency to synchronized operation with an electrical power distribution system of mainly a low voltage class.

This paper reviews the development of advanced engineering solutions to control parallel low capacity generator unit operation with an electrical network.

The authors present the outcomes of both theoretical (analysis of means and methods of control) and experimental tests of opportunities and effectiveness of connection of low-capacity generator units to a synchronized electrical system.

Development of controlled intelligent connection which makes it possible to synchronously connect stand-alone power supply systems to the united power grid and cut them off in the case of malfunctions is one of the most promising development trends of the prospective power sector. A solution to this engineering task is essential and is provided for within the Russian National technological initiative of the Energynet road map. One of such solutions is a proposed automated control of a local power supply system parallel operation with an exterior electrical network.

The authors together with department of electrical power systems of the Novosibirsk State Technical University have developed and tested innovation automated control of synchronized low capacity power plant operation with an exterior electrical power system using a physical simulator implemented based on the proposed and patented method of leading balanced timing of generators. Its application in electrical networks was studied.

The scientific novelty is in the study of efficiency of means and methods of synchronized control of low capacity generation in electrical networks.

Keywords: low capacity synchronized generation, stand-alone operation, parallel mode with the network, control, automation, tests

REFERENCES

1. Buchholz B.M., Styczynski Z. *Smart grids: fundamentals and technologies in electricity networks*. Heidelberg, New York, Springer, 2014 (Russ. ed.: Bukhgo'l'ts B.M., Stychinski Z.A. *Smart Grids – osnovy i tekhnologii energosistem budushchego*. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ., 2017. 461 p.).
2. Fishov A.G., Landman A.K., Serdyukov O.V. [SMART technology for connection to electric networks and control regimes of small generation]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proceedings to VIII International Scientific and Technical Conference "Power energy through the eyes of youth"], Samara, 2–6 October, 2017, vol. 1, pp. 27–34. (In Russian).
3. Khokhlov A., Mel'nikov Yu., Veselov F., Kholkin D., Datsko K. *Raspredeleonnaya energetika v Rossii: potentsial razvitiya* [Distribution energy in Russia: development potential]. Moscow, Skolkovo Energy Center Publ., 2018.
4. Mukatov B.B., Fishov A.G. Disintegration of power grid as part of the task of increasing functionality of electric system. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 25, p. 03009. DOI: 10.1051/e3sconf/20172503009.
5. Mukatov B.B., Fishov A.G. Mukatov B.B., Fishov A.G. Dezintegratsiya elektricheskoi seti v zadache povysheniya funktsional'nosti energosistemy [Disintegration of power grid as part of the task of increasing functionality of electric system]. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti*

* Received 22 September 2018.

bol'shikh sistem energetiki [Methodical issues study of the reliability of large energy systems]. Irkutsk, 2017, iss. 68, pp. 505–514.

6. Kucherov Yu.N., Berezovskii P.K., Veselov F.V., Ilyushin P.V. Analiz obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy k raspredelennym istochnikam energii pri ikh integratsii v energosistemu [Analysis of technical regulations for distributed generation, integrated into power system]. *Elektricheskie stantsii – Power Plants*, 2016, no. 3 (1016), pp. 2–10.

7. Ilyushin P.V., Sukhanov O.A. The structure of emergency-management systems of distribution networks in large cities. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 3, pp. 133–137.

8. Fishov A., Marchenko A. The impact of distributed generation on power quality of the electric network. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 792, pp. 248–254. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.248.

9. Fishov A.G., Marchenko A.I. Synchronized mode operation of distributed generation in power grid. *12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017): proceedings*, Korea, Ulsan, 31 May – 2 June 2017, vol. 1, pp. 276–280.

10. Marchenko A.I., Mukatov B.B., Fishov A.G. *Sposob protivoavariinogo upravleniya rezhimom paralel'noi raboty sinkhronnykh generatorov v elektricheskikh setyakh* [Method to emergency control the mode in parallel operation of pooled generators in electrical networks]. Patent RF, no. 2662728, 2016.

11. *STO 59012820.29.240.001–2011. Avtomaticheskoe protivoavariinoe upravlenie rezhimami energosistem. Protivoavariinaya avtomatika energosistem. Usloviya organizatsii protsesssa. Usloviya sozdaniya ob"ekta. Normy i trebovaniya* [Standard organization 59012820.29.240.001–2011. Automatic emergency control the modes of power systems. Emergency power system automation. Terms of process organization. Conditions for creating an object. Standards and requirements.]. Moscow, "SO UPS", JSC Publ., 2011.

12. Fishov A.G., Marchenko A.I. Avtomatika operezhayushchego deleniya v skhemakh prisoedineniya maloi generatsii k elektricheskoi seti [Automation outpacing fission in unit wiring diagram small generation of electrical networks]. *Operativnoe upravlenie v elektroenergetike. Podgotovka personala i podderzhanie ego kvalifikatsii – Operational management in the power industry. Training and maintaining staff qualifications*, 2017, no. 5, pp. 8–18.

13. Gezha E.N., Glazyrin V.E., Glazyrin G.V., Ivkin E.S., Marchenko A.I., Semendyaev R.Yu., Serdyukov O.V., Fishov A.G. Sistemnaya avtomatika dlya integratsii lokal'nykh sistem elektro-snabzheniya s sinkhronnoi maloi generatsiei v elektricheskii seti [System automation for the integration of local power supply systems with synchronous low generation in electrical networks]. *Releishchik – Relayman*, 2018, no. 2, pp. 24–31.

14. Fishov A.G., Marchenko A.I., Murashkina I.S., Erdenebat E., Ivkin Y.S. Automation of unmanned low capacity power plant with synchronized generation. *2018 14th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 44894 proceedings*, 2018, vol. 1, pt. 5, pp. 108–114. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545916.

15. Fishov A.G., Semendyaev R.Y., Ifkin E. Reconfiguration of the electric grid, regulators and modes control of the "unmanned power station" of low power at parallel operation with an external grid. *The 13th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2018): proceedings*, Harbin, China, 30 May – 1 June, 2018, pp. 898–901.

Для цитирования:

Марченко А.И., Денисов В.В., Мурашкина И.С. Средства и способы управления параллельной работой электрической станции малой генерации с электрической сетью // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 77–90. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-77-90.

For citation:

Marchenko A.I., Denisov V.V., Murashkina I.S. Sredstva i sposoby upravleniya paralel'noi rabotoi elektricheskoi stantsii maloi generatsii s elektricheskoi set'yu [Means and methods of control of low capacity power plant with]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 77–90. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-77-90.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.656.25

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-91-106

Структурная организация управляющих автоматов с изменяемым принципом формирования команд*

Ю.Ф. МУХОПАД^{1,a}, А.Ю. МУХОПАД^{1,b}, Д.Ц. ПУНСЫК-НАМЖИЛОВ^{2,c}

¹ 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения

² 634034, РФ, г. Томск, ул. Советская, 99, ООО «Химтех-Юкос»

^a bts48@mail.ru ^b jcmg@mail.ru ^c tomskalina@mail.ru

Рассматриваются вопросы синтеза управляющих автоматов сложных технических систем реального времени. Предварительно граф-схема алгоритма преобразуется за счет ввода пустых операторов в отдельные ветви. Пустые операторы вводятся для ликвидации петель, а также если между логическими операторами нет операторов действия или к одному логическому условию передается управление от двух и более операторов. В структурную схему управляющего автомата Мура вводится дешифратор между регистром состояний и комбинационной схемой переходов. Выбор одного логического условия из всего множества реализуется импульсом, соответствующим номеру состояния автомата. Комбинационная схема переходов реализуется по двухуровневой структуре из логических схем «И» – «ИЛИ». Причем затраты оборудования на такую схему переходов в 2-3 раза меньше, чем для типовых автоматов Мура, так как в новой схеме используются только двухвходовые схемы «И», число которых равно удвоенному числу логических условий. Такой автомат наиболее эффективен для сложных технических систем с числом состояний не более 32, которые используются в мехатронике и технологических процессах контроля транспортного оборудования. Автомат Мура с новой структурной организацией сравнивается с новым автоматом Мухопата, в структурную организацию которого введен логический блок с числом двухвходовых элементов «И», равным числу логических условий. При этом изменено понятие состояния УА с разметкой входа каждого оператора алгоритма управления. Такие автоматы используются в системах с большим числом состояний и логических условий.

Ключевые слова: алгоритм, управление, автомат, кодирование, комбинационные схемы, математическая модель, логические условия, операторы действия

* Статья получена 11 декабря 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Управляющие автоматы (УА) в сложных технических системах мехатроники, технологических процессов и беспилотных летательных аппаратов реализуются по известной структурной схеме Мура (УАМр), математическая модель которой имеет вид

$$a(t+1) = F_1(\alpha_1 \dots \alpha_q x_1 \dots x_m); \quad A(t+1) = F_2(y_1 \dots y_m).$$

Здесь $\alpha_1 \dots \alpha_q$ – входные логические условия; $x_1 \dots x_m$ и $y_1 \dots y_m$ – коды предыдущего $a(t)$ и последующего $a(t+1)$ состояний УА; F_1 и F_2 – системы булевых функций.

По классификации работы [1] УА разделяются на сверхпростые (СП), простые (ПА), средние (СА), сложные (АС), высокосложные (ВС), особо сложные (ОС) и ультрасложные (УС) автоматы.

Методика синтеза УА Мура детально разработана в работах [2–7]. Согласно методике при реализации схемы переходов F_1 на ПЗУ его объем определится как $V = m2^{m+q}$ бит. При использовании типовых промышленных ПЗУ с разрядностью 4 или 8 объем комбинационной схемы определится как $V_p = m_p 2^{m+q}$. При реализации комбинационной схемы на ПЛМ число входов будет равно $(m + q)$, а число выходов равно m .

Наиболее распространены УА класса СП, ПА, СА, но для сложных технических систем алгоритмы управления декомпозируются, а управляющая подсистема представляется в виде взаимодействующих УА меньшей сложности. Но даже для УА класса СА комбинационная схема с числом входов, равным 14, и числом выходов, равным пяти, потребует ПЛМ с характеристиками (16, k , 8). То есть комбинационная схема F_1 не будет простой (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Сравнительный анализ УА

Comparative analysis of CA

№ п/п	Тип	m	q	$m + q$	V_p	m_p
1	СП	3	3	6	256	4
2	ПА	4	6	10	1024	4
3	СА	5	9	14	$128 \cdot 10^3$	8
4	АС	6	12	18	$2 \cdot 10^6$	8
5	ВС	7	15	22	$32 \cdot 10^6$	8
6	ОС	8	18	26	$0,5 \cdot 10^9$	8
7	УС	9	21	30	$12 \cdot 10^9$	12

1. СИНТЕЗ АВТОМАТОВ НОВОГО ТИПА

В работе [1] изменена методика синтеза УА за счет предварительного преобразования ГСА по следующим правилам:

1) между любыми α_i и α_j , не разделенными операторами действия $A_1 \dots A_k$, поставим пустой оператор;

2) пустой оператор ставится также и перед любым $\alpha_j \in \{\alpha\}$, если к нему передается от двух и более других операторов;

3) для ликвидации петель перед оператором, в котором образуется петля, ставится пустой оператор.

На рис. 1 представлена преобразованная ГСА, но исходная ГСА легко восстанавливается, если убрать пустые операторы.

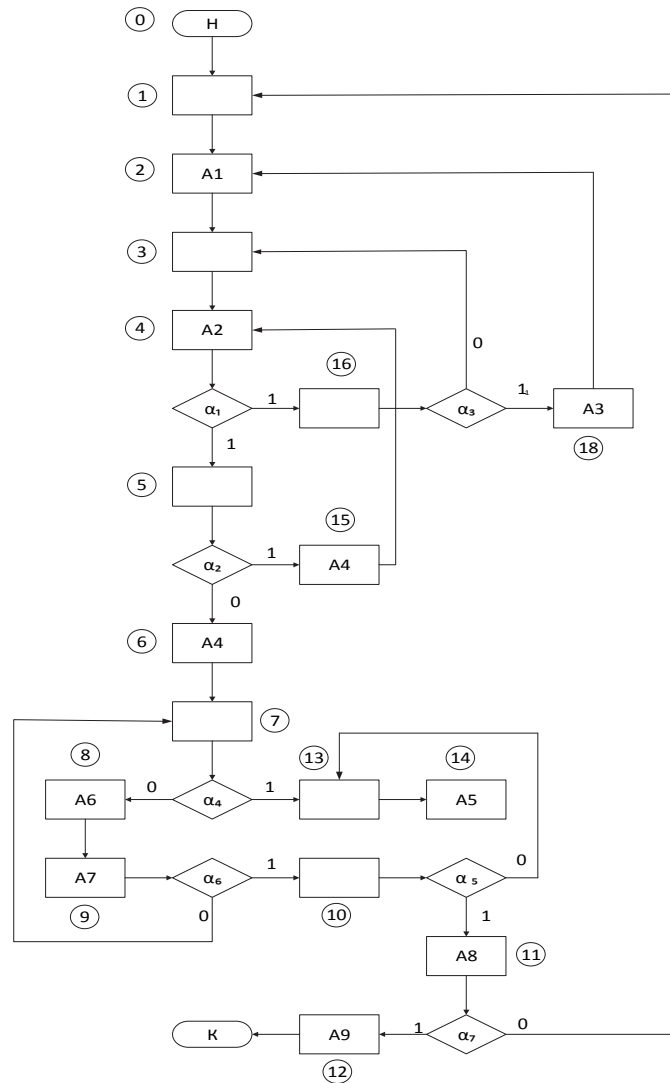


Рис. 1. Алгоритм управления

Fig. 1. Control algorithm

Для упрощения процедуры контроля УА за счет ввода пустых операторов ГСА приводится к виду с операторами действия $A_1 \in \{A\}$, имеющими только два входа.

Этой ГСА соответствует граф переходов рис. 2.

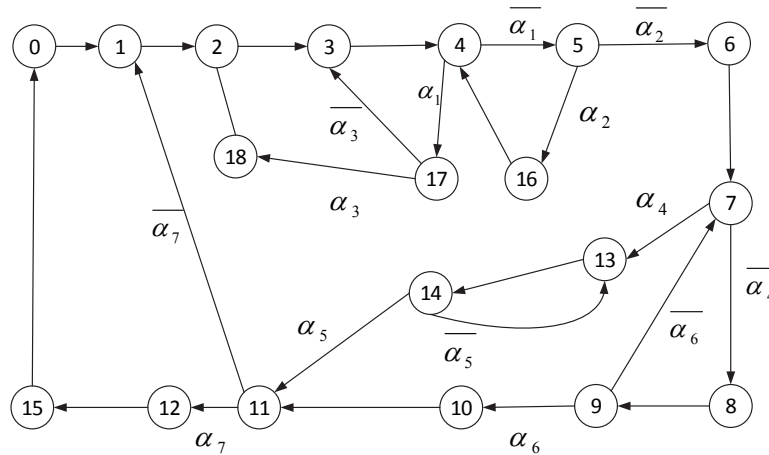


Рис. 2. Граф переходов управляющего автомата

Fig. 2. Transition graph of the control automation

На рис. 3 представлен УАМг с новой структурной организацией. От типового УАМг новая схема отличается двумя особенностями:

– введением $DC(10)$ между $Pg\ a(t)$ и $F_1(2)$;

– введением комбинационной схемы $F_1(2)$ в виде специализированной ПЛМ из $2q$ двухвходовых элементов «И» и элементов «ИЛИ». Схема $F_1(2)$ реализована на основе алгоритма преобразованной ГСА за счет ввода пустых операторов.

$DC(10)$ по сигналу опроса τ_1 выдаст импульс опроса схемы $F_1(2)$ только по одному из выходов $a_i(t) \in \{a(t)\}$ в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Выбор логических условий

The choice of logical terms

α_j	1	2	3	4	5	6	7
$a(t)$	4	5	17	7	14	9	11

Комбинационная схема $F_1(2)$ в предлагаемом управляющем автомате состоит из элементов «И», «ИЛИ». В двухуровневой схеме $F_1(2)$ будет использоваться на первом уровне только $2q$ (в данном случае 14) двухвходовых схем «И».

Для реализации $F_1(2)$ в этом УАМг потребуется 19 двухвходовых схем «И» (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

Количество элементов «И» в УАМг
The number of elements “AND” in CAMg

$a(t)$	2	3	4	6	7	Σ
α	$\overline{\alpha_1 \alpha_3}$ $\overline{\alpha_1 \alpha_2}$ $\overline{\alpha_1 \alpha_2}$ $\alpha_1 \alpha_3$	α_4 $\overline{\alpha_4}$	α_5 $\overline{\alpha_5}$	α_6 $\overline{\alpha_6 \alpha_4}$ $\overline{\alpha_6 \alpha_4}$	α_7 $\overline{\alpha_7}$	
Σ	8	2	2	5	2	19

Кроме того, в графе имеются петли. Схема неоднородна, так как имеются как двухвходовые, так и трехвходовые схемы «И». То есть схема $F_1(2)$ типового УАМг требует более сложной процедуры при контроле правильности функционирования УА. В данном небольшом примере количественная разница в числе двухвходовых схем «И» ~30%. Для УА с количеством логических условий, образующих непрерывные цепочки с большим числом $\alpha_j \in \{\alpha\}$, разница может быть существенной. Но даже для такого примера эффективность ~30% недостижима при использовании известных способов декомпозиции и минимизации систем булевых функций в классическом УАМг.

Унитарное кодирование в УАМг не является новым способом при синтезе [1, 2, 10]. Например, в работе [10] не используются дешифраторы вообще, а вместо $R_7(3)$ и $R_7(7)$ с ДПК используется один регистр $R_7(3)$ с унитарным кодом состояния $a(t)$. Однако совместное использование унитарного кодирования с предварительным преобразованием ГСА за счет ввода пустых операторов ранее не применялось. А именно эти два фактора и обеспечивают преимущества УАМг с новой структурной организацией.

УАМг с унитарным кодированием эффективен при числе состояний ≤ 32 . При большем числе состояний используется два подхода:

– применение оригинальной структуры УА с вводом мультиплексора и схемы адресации для выбора одного $\alpha_j \in \{\alpha\}$ для каждого периода T функционирования (автомат Мухопата – УАМх [1, 8]);

– применение автомата, использующего принципиально новое определение состояний.

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ

Целесообразно сравнить новый УА Мура (НУАМг) с автоматами Мухопеда (УАМх) – [1]. В УАМх введены мультиплексор и схема адресации, за счет чего объем ПЗУ схемы $F_1(2)$ снижается в 2^{q-1} раз.

Рассмотрим пример ГСА простого УА (рис. 5), которому через разметку состояний по операторам действия соответствует граф рис. 6.

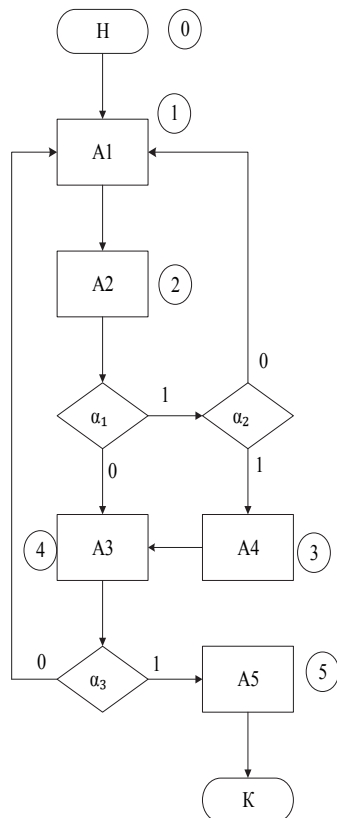


Рис. 5. Нумерация состояний ГСАУАМг

Fig. 5. GCA CAMr states numbering

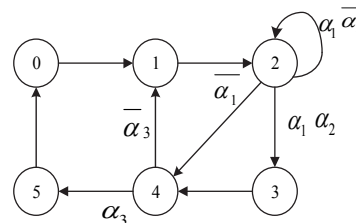
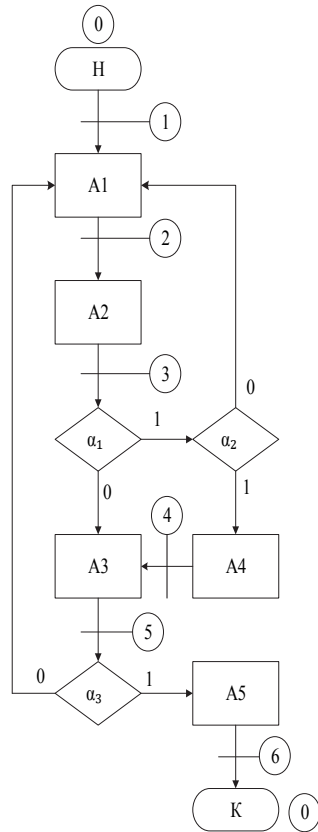
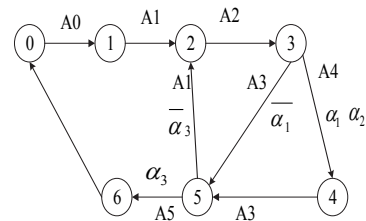


Рис. 6. Граф УАМг

Fig. 6. The CAMr graph

ГСА с разметкой через переходы представлен на рис. 7, а его граф – на рис. 8. Далее для синтеза УА использован новый, ранее не применявшийся способ определения состояний [11].

Рис. 7. Нумерация состояний ГСА УАМ_LFig. 7. GSA CAM_L states numberingРис. 8. Граф УАМ_LFig. 8. The CAM_L graph

Если для УАМ_г и УАМ_х состояния определяются по операторам действия $A_1 \dots A_k$, а для УА Мили (УАМ_L) состояния соответствуют переходам от $a(t)$ к $a(t+1)$, то для новых автоматов (НУАМ_х) на ГСА отмечается начало всех операторов – как операторов действия, так и логических операторов. Новая разметка ГСА приведена на рис. 9, а граф переходов – на рис. 10.

Анализ графа и таблицы переходов позволяют сделать заключение о том, что для НУАМ_х [16] в этом примере целесообразно выбрать структуру памяти со счетчиком вместо регистра $a(t)$. Признак γ как условие прибавления «1» к содержимому счетчика будет вычисляться также в схеме переходов.

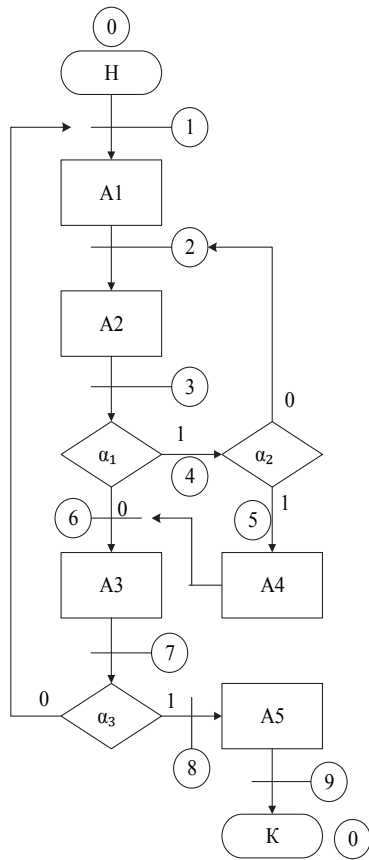


Рис. 9. Нумерация состояний ГСА NYAMx

Fig. 9. Numbering of states GCA CAMkh

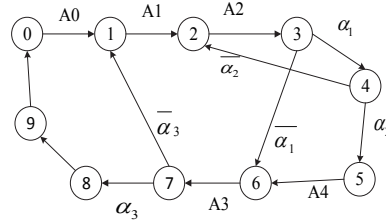


Рис. 10. Граф NYAMx

Fig. 10. The CAMkh graph

Переходы для УАМг представлены в табл. 4, а для NYAMx – в табл. 5.

Таблица 4

Table 4

Переходы УАМг

CAMr transitions

№ п/п	$a(t)$	α	$N(t)$	$a(t+1)$	$N(t+1)$	y_3	y_2	y_1
0			$x_3x_2x_1$		$y_3y_2y_1$			
1	0	–	000	1	001			1
2	1	–	001	2	010		1	
3	2	$\alpha_1\alpha_2$	010	3	011		2	2
4	2	$\alpha_1\overline{\alpha_2}$	010	2	010		3	
5	2	$\overline{\alpha_1}$	010	4	100	1		
6	3	–	011	4	100	2		
7	4	α_3	100	5	101	3		3
8	4	$\overline{\alpha_3}$	100	1	001			4
9	5	–	101	0	000			

Таблица 5

Table 5

Переходы НУАМх
SAMkh transitions

№ п/п	$a(t)$	α	$N(t)$	$a(t+1)$	$N(t+1)$	y_4	y_3	y_2	y_1
0			$x_4x_3x_2x_1$		$y_4y_3y_2y_1$				
1	0	–	0000	1	0001				1
2	1	–	0001	2	0010			1	
3	2	–	0010	3	0011			2	2
4	3	α_1	0011	4	0100		1		
5	3	$\overline{\alpha_1}$	0011	6	0110		2	3	
6	4	α_2	0100	5	0101		3		3
7	4	$\overline{\alpha_2}$	0100	2	0010			4	
8	5	–	0101	6	0110		4	5	
9	6	–	0110	7	0111		5	6	4
10	7	α_3	0111	8	1000	1			
11	7	$\overline{\alpha_3}$	0111	1	0001				5
12	8	–	1000	9	1001	2			6
13	9	–	1001	0	0000				

Тогда в схеме переходов необходимо вычислять систему булевых функций (с.б.ф.) только для трех переходов (табл. 6), а признак γ определяется по формуле

$$\gamma = \alpha_0(a_0 + a_1 + a_2 + a_5 + a_6 + a_9) + \alpha_1a_3 + \alpha_2a_4 + \alpha_3a_7.$$

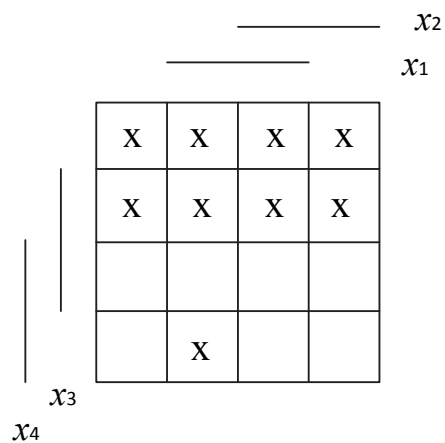
Таблица 6

Table 6

Переходы вне счетчика НУАМх
Transitions outside the counter NCAMkh

№ п/п	$a(t)$	α	$N(t)$	$a(t+1)$	$N(t+1)$	y_3	y_2	y_1
5	3	$\overline{\alpha_1}$	011	6	110	1	1	
7	4	$\overline{\alpha_2}$	100	2	010		1	
11	7	$\overline{\alpha_3}$	111	1	001			1

Так как γ вычисляется только при $\alpha_0\alpha_1\alpha_3$ (которые равны «1»), то карта Карно составляется по значениям переменных $x_4x_3x_2x_1$ (рис. 11).

Рис. 11. Карта Карно для γ Fig. 11. The Karnaugh map for γ

После минимизации получим $\gamma = \overline{x_4} + \overline{x_4x_3x_2x_1}$. По табл. 6 для схемы $F_1(1)$ с.б.ф. примет вид

$$y_3 = \overline{\alpha}x_3x_2x_1,$$

$$y_2 = \overline{\alpha}x_3x_2x_1 + \overline{\alpha_3}x_3\overline{x_2}x_1,$$

$$y_1 = \overline{\alpha}x_3x_2x_1.$$

Для вычисления значений y_3, y_2, y_1 потребуется 9 двухвходовых элементов «И» и 3 элемента «ИЛИ» в схеме $F_1(1)$, тогда как для НУАМг всего

6 элементов «И». То есть для автоматов класса СП и ПА при унитарном кодировании НУАМг проще даже, чем НУАМх с памятью на счетчике.

Хотя для УА более высокого уровня сложности преимущества НУАМх бесспорны. Структурная схема НУАМх приведена на рис. 12.

Анализ графа переходов рис. 10 позволяет сделать заключение о том, что при новом способе определения состояний команды управления в НУАМх формируются на переходах, как и в УАМ_L (рис. 8), но в отличие от УАМ_L в НУАМх не две, а одна схема переходов $F_1(1)$. Если в структуру блока синхронизации ввести таймер для выдержки времени $T \gg \tau$, то без изменения структурной организации НУАМх будут формироваться команды управления, как в УАМг.

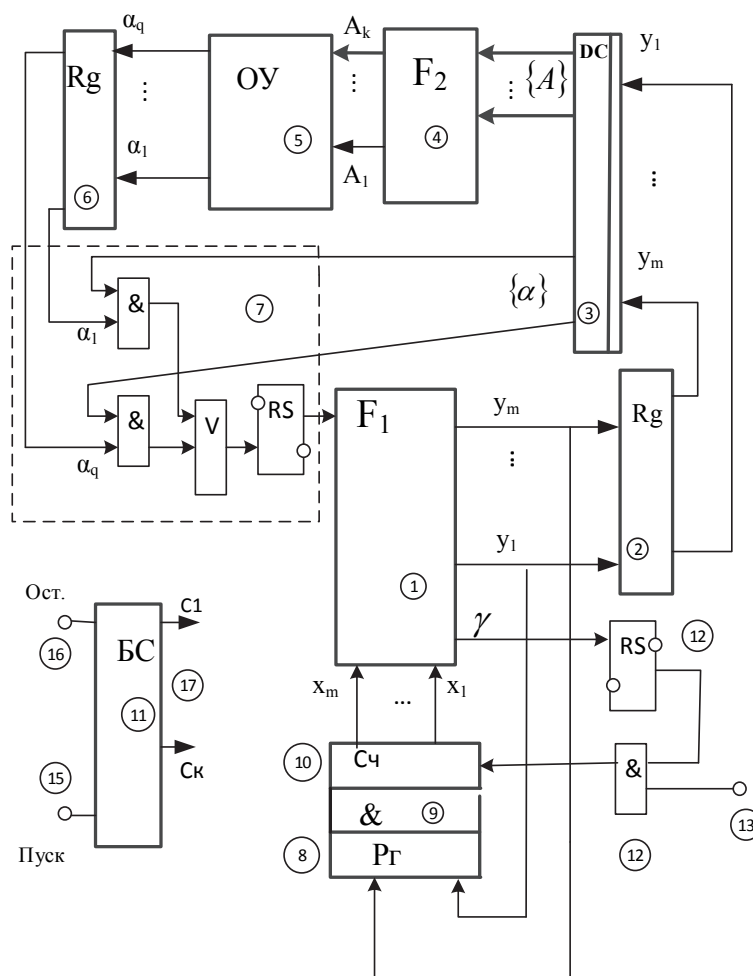


Рис. 12. Структурная схема нового автомата Мухопода

Fig. 12. Structural scheme of a new Mukhopad automaton

Таким образом, в обоих вариантах реализации управляющих автоматов изменены принципы формирования управляющих команд по сравнению с УАМг и УАМ_L.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация управляющих автоматов (УА) с существенным снижением затрат оборудования комбинационных схем переходов достигается двумя способами:

– в автоматах Мура за счет предварительного тождественно эквивалентного преобразования алгоритма через ввод пустых операторов в отдельные ветви граф-схемы и использование унитарного кодирования состояний;

– в оригинальных автоматах Мухопида через новое определение состояний с разметкой начала любого оператора граф-схемы и введения логического блока с числом двухходовых элементов «И», равным числу логических условий. При этом адресация элементов «И» реализуется дешифратором, выходы которого разделены на два непересекающихся подмножества для выбора одного логического условия и выбора операторов действия.

Первый вариант целесообразно использовать для сверхпростых и простых УА (число состояний ≤ 32), а второй – для УА более высокого уровня сложности. Обе структуры УА являются новыми и найдут применение в информационных системах мехатроники, транспорта и для управления критическими технологическими процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухопида А.Ю. Теория управляющих автоматов технических систем реального времени. – Новосибирск: Наука, 2015. – 176 с.
2. Гаврилов М.А., Деятков В.В., Пупырев Е.И. Логическое проектирование дискретных автоматов. – М.: Наука, 1977. – 368 с.
3. Баранов С.И., Синев В.Н., Янцен Н.Я. Синтез автоматов на элементах с матричной структурой // Проектирование функционально-ориентированных вычислительных систем. – Л.: ЛГУ, 1990. – С. 90–108.
4. Уилкинсон Б. Основы проектирования цифровых схем. – М.; СПб.; Киев: Вильямс, 2004. – 320 с.
5. Закревский А.Д., Поттосин Ю.В., Черемисинова Л.Д. Основы логического проектирования. Кн. 3. Проектирование устройств логического управления. – Минск: Беларусь, 2004. – 226 с.
6. Соловьев В.В., Климович А. Логическое проектирование цифровых систем на основе ПЛИС. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 374 с.
7. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств / под ред. В.В. Сапожникова и Вл.В. Сапожникова. – СПб.: Элмор, 2009. – 894 с.
8. Патент 82888 Российская Федерация, G 06 F 9/00. Микропрограммный автомат / А.Ю. Мухопида, Ю.Ф. Мухопида; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. – № 2008149344/22; заявл. 15.12.2008; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
9. Патент 2527190 Российская Федерация, МПК G 06 F 9/00. Управляющий автомат / А.Ю. Мухопида, Ю.Ф. Мухопида, Д.Ц. Пунсык-Намжилов; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. – № 2013110986/08; заявл. 12.03.2013; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.
10. Мухопида Ю.Ф. Проектирование специализированных микропроцессорных вычислителей. – Новосибирск: Наука, 1981. – 162 с.
11. Мухопида Ю.Ф., Мухопида А.Ю., Пунсык-Намжилов Д.Ц. Управляющие автоматы мехатроники с новым определением состояний // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2018. – № 2. – С. 184–190.
12. Хоткрофт Д., Мотвани Р., Ульман Д.Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2016. – 528 с.

13. Кудрявцев В.Б., Алешин Ф.Б., Подколзин А.С. Теория автоматов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2018. – 320 с.
14. Баркалов А.А., Титаренко Л.А. Прикладная теория цифровых автоматов. – Донецк: ДонНТУ: Технопарк ДонНТУ УНИТЕХ, 2013. – 320 с.
15. Ожиганов А.А. Теория автоматов. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 84 с.
16. Патент 183109 Российская Федерация. Управляющий автомат / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад, Д.Ц. Пунсык-Намжилов. – Опубл. 11.09.2018, Бюл. № 26.

Мухопад Юрий Федорович, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный профессор кафедры автоматизации производственных процессов Иркутского государственного университета путей сообщения, академик РАН, академик АИИН РФ, академик Академии космонавтики. Область научных интересов: анализ и синтез микропроцессорных систем. Число научных публикаций 392. E-mail: bts48@mail.ru

Мухопад Александр Юрьевич, доктор технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов Иркутского государственного университета путей сообщения. Область научных интересов – элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. Число научных публикаций 86. E-mail: jcmg@mail.ru

Пунсык-Намжилов Даба Цыренович, кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО «Химтех-Юкос». Область научных интересов: синтез аналого-цифровых функциональных преобразователей. Число научных публикаций 60. E-mail: dablutf@mail.ru

Mukhopad Yuri Fedorovich, D. Sc. (Eng.), RF Honored Scientist, professor emeritus at the department of industrial process automation, Irkutsk State Transport University. He is academician of RAN, academician of RF AIS and academician of the Russian Academy of Cosmonautics. His main research field includes analysis and synthesis of microprocessor systems. He has published 392 research papers. E-mail: bts48@mail.ru

Mukhopad Alexander Yurievich, D.Sc. (Eng.), an associate professor at the department of industrial process automation, Irkutsk State Transport University. His main research field covers elements and devices of computing hardware and control systems. He is the author of 86 publications. E-mail: jcmg@mail.ru

Punsik-Namzhilov Daba Tsyrenovich, PhD (Eng.), an associate professor, director general of LLC Himtech-Yukos. His research interests are focused on synthesis of analog and digital functional converters. He is the author of 60 publications. E-mail: dablutf@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-91-106

Structural organization of control automata with a variable principle of instruction formation*

Yu.F. MUKHOPAD^{1,a}, A.Yu. MUKHOPAD^{1,b}, D.C. PUNSIK-NAMZHILOV^{2,c}

¹ Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation

² LLC Himtech-Yukos, 99, Sovetskaya Street, Tomsk, 634034, Russian Federation

^a bts48@mail.ru ^b jcmg@mail.ru ^c tomskalina@mail.ru

Abstract

The problems of synthesis of control automata of complex real time technical systems are considered. The algorithm flowgraph is first converted by introducing empty operators into separate branches. Empty operators are introduced to eliminate the loops or also if there are no

* Received 11 December 2018.

action statements between logical operators or if control from two or more operators is transferred to one logical condition. The decoder is introduced between the status register and the combinational scheme of the transitions in the structural circuit of the Moore automatic machine (FSM). The choice of one logical condition from the whole set is realized by a pulse corresponding to the state number of the automaton. Matching the navigation scheme is implemented on a two-tier structure of the logic "AND"- "OR". Moreover, hardware costs for such a scheme of transitions is 2-3 times less than for typical Moore automata because a new scheme uses only two-input "and" schemes, the number of which is equal to a double number of logical conditions. This machine is most effective for complex technical systems with a number of states no more than 32. These systems are used in mechatronics and technological processes of transport equipment control. The Moore automatic machine with a new structural organization is compared with a new Muhopad machine, in whose structural organization a logical block with a number of two-input elements "and" equal to the number of logical conditions is introduced. In doing so the concept of the WA state with marking the input of every operator of the control algorithm is changed. Such automata are used in systems with a large number of states and logical conditions.

Keywords: Algorithm, control, automaton, coding, combinatorial schemes, mathematical model, logical conditions, action statements

REFERENCES

1. Mukhopad A.Yu. *Teoriya upravlyayushchikh avtomatov tekhnicheskikh sistem real'nogo vremeni* [Theory of control automata of technical systems of real time]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2015. 176 c.
2. Gavrilov M.A., Devyatkov V.V., Pupyrev E.I. *Logicheskoe proektirovanie diskretnykh avtomatov* [Logical design of discrete automata]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 368 p.
3. Baranov S.I., Sinev V.N., Yantsen N.Ya. Sintez avtomatov na elementakh s matrichnoi strukturoi [Synthesis of automata on elements with a matrix structure]. *Proektirovanie funktsional'no-orientirovannykh vychislitel'nykh sistem* [Design of functionally oriented computational systems]. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1990, pp. 90–108.
4. Wilkinson B. *The essence of digital design*. London, Prentice Hall Europe, 1998 (Russ. ed.: Uilkinton B. *Osnovy proektirovaniya tsifrovyykh skhem*. Moscow, Williams Publ., 2004. 320 p.).
5. Zakrevskii A.D., Pottosin Yu.V., Cheremisinova L.D. *Osnovy logicheskogo proektirovaniya*. Kn. 3. *Proektirovanie ustroystv logicheskogo upravleniya* [logical design basics. Bk. 3. Design of logical control devices]. Minsk, Belarus' Publ., 2004. 226 p.
6. Solov'ev V.V., Klimovich A. *Logicheskoe proektirovanie tsifrovyykh sistem na osnove programmiruemyykh logicheskikh integral'nykh skhem* [Logical design of digital systems based on FPGA]. Moscow, Hotline-Telecom Publ., 2008. 374 p.
7. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., ed. *Trudy po teorii sinteza i diagnoza konechnykh avtomatov i releinykh ustroystv* [Works on the theory of synthesis and diagnosis of finite automata and relay devices]. St. Petersburg, Elmore Publ., 2009. 894 p.
8. Mukhopad A.Yu., Mukhopad Yu.F. *Mikroprogrammnyi avtomat* [Firmware machine]. Patent RF, no. 82888, 2009.
9. Mukhopad A.Yu., Mukhopad Yu.F., Punsyk-Namzhilov D.Ts. *Upravlyayushchii avtomat* [Managing automatic]. Patent RF, no. 2527190, 2014.
10. Mukhopad Yu.F. *Proektirovanie spetsializirovannykh mikroprotssornykh vychislitelei* [Design specialized microprocessor calculators]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 162 p.
11. Mukhopad A.Yu., Mukhopad Yu.F., Punsyk-Namzhilov D.Ts. *Upravlyayushchie avtomaty mekhatroniki s novym opredeleniem sostoyanii* [Control machines mechatronics with a new definition of the states]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika – Mechatronics, automation and robotics*, 2018, no. 2, pp. 184–190.
12. Hopcroft J.E., Motwani R., Ullman J.D. *Introduction to automata theory, languages and computation*. 2nd ed. Boston, Addison-Wesley, 2001 (Russ. ed.: Khopkroft D., Motvani R., Ul'man D.D. *Vvedenie v teoriyu avtomatov, yazykov i vychislenii*. 2nd ed. Moscow, Williams Publ., 2016. 528 p.).

13. Kudryavtsev V.B., Aleshin F.B., Podkolzin A.S. *Teoriya avtomatov* [Theory of automata]. 2nd ed. Moscow, Yurait Publ., 2018. 320 p.
14. Barkalov A.A., Titarenko L.A. *Prikladnaya teoriya tsifrovyykh avtomatov* [Applied theory of digital automata]. Donetsk, Donetsk National Technical University Publ., 2013. 320 p.
15. Ozhiganov A.A. *Teoriya avtomatov* [Automata theory]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2013. 84 p.
16. Mukhopad A.Yu., Mukhopad Yu.F., Punsyk-Namzhilov D.Ts. *Upravlyayushchii avtomat* [Control machine]. Patent RF, no. 183109, 2018.

Для цитирования:

Мухопад Ю.Ф., Мухопад А.Ю., Пунсык-Намжилов Д.Ц. Структурная организация управляющих автоматов с изменяемым принципом формирования команд // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 91–106. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-91-106.

For citation:

Mukhopad A.Yu., Mukhopad Yu.F., Punsik-Namzhilov D.Ts. Strukturnaya organizatsiya upravlyayushchikh avtomatov s izmenyaemym printsipom formirovaniya komand [Structural organization of control automata with a variable principle of the formation of teams]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 91–106. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-91-106.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.3: 529.7

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-107-124

Адаптивные модели временных рядов в системах обработки измерительной информации*

И.А. СЕРЫШЕВА^а, Ю.П. ХРУСТАЛЕВ^б

664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследова-
тельский технический университет

^а sia_cyber@mail.ru ^б khrustalev@istu.irk.ru

Точность современных информационно-измерительных систем обусловлена как непосредственно измерительными схемами, так и алгоритмами обработки данных. В настоящей работе рассмотрены вопросы снижения алгоритмической погрешности групповых эталонов времени и частоты, которые можно рассматривать как сложные информационно-измерительные системы.

Погрешность оценивания вектора состояния эталона может быть уменьшена на 15...20 % за счет использования более совершенных алгоритмов обработки измерительной информации, в частности, за счет применения алгоритмов, опирающихся на использование динамических стохастических моделей. Однако, для построения таких моделей необходимы эмпирические временные ряды, содержащие, по крайней мере, не менее ста элементов. При обработке данных, получаемых на суточных интервалах, это приводит к задержкам между моментом включения в состав группового эталона нового стандарта и началом использования результатов измерений, полученных с его участием, примерно на один квартал. Естественный способ уменьшения этой временной задержки заключается в построении прогнозирующих моделей по укороченному временно-му ряду с последующей их адаптацией по мере поступления новых результатов измерений.

В статье предложено для адаптации моделей временных рядов, описывающих процессы изменения относительных отклонений частоты водородных генераторов, составляющих основу отечественных эталонов времени и частоты, использовать метод стохастического квазиградиента, сводящийся к построению последовательности точек в пространстве параметров динамических стохастических моделей. Рассмотрен алгоритм адаптации, реализующий предложенный метод. Приведены результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие работоспособность метода при адаптации модели одномерного временного ряда. Полученные результаты обобщены на случай многомерных моделей, а также на случай адаптации прогнозирующих моделей временных рядов, содержащих наряду со стохастической составляющей детерминированные тренды.

Предлагаемый авторами подход позволяет почти вдвое сократить временную задержку, связанную с накоплением исходных данных, необходимых для построения прогнозирующих моделей, используемых для оценивания состояния групповых эталонов.

* Статья получена 14 ноября 2018 г.

Ключевые слова: динамические стохастические модели, временные ряды, групповые эталоны физических величин, адаптивные модели, стохастическая аппроксимация, стохастический квазиградиент, модели авторегрессии – скользящего среднего, пространство параметров модели, адаптация прогнозирующих моделей

ВВЕДЕНИЕ

Погрешность информационно-измерительных систем обусловлена как непосредственно измерительными схемами, так и алгоритмами обработки данных. В настоящей работе рассмотрены вопросы снижения алгоритмической погрешности групповых эталонов единиц времени и частоты (ЭВиЧ), которые можно рассматривать как сложные информационно-измерительные системы.

Групповые ЭВиЧ предназначены для воспроизведения, хранения и передачи единиц времени и частоты в соответствии с их определением в системе СИ, а также для формирования, хранения и передачи координированных шкал времени. Точность воспроизведения и хранения единиц времени и частоты определяется как аппаратурной базой, так и методами обработки измерительной информации, получаемой в процессе ведения эталонов. В настоящее время существует большое количество алгоритмов для вычисления шкал времени, характеризующих состояние эталона. Наиболее часто используемые методы расчета являются различными модификациями базовых уравнений шкалы времени [1–6] либо используют фильтрацию Калмана [4–9]. Алгоритмы, основанные на фильтре Калмана, в том числе и субоптимальной фильтрации, позволяют достаточно точно оценить состояние группового эталона и, как правило, дают лучшие результаты по сравнению с методами, основанными на модификации базового уравнения шкалы времени. Однако для их работы требуется априорная информация о параметрах стандартов, входящих в групповой ЭВиЧ.

Практически все современные алгоритмы оценивания вектора состояния групповых ЭВиЧ, опирающиеся на использование прогнозирующих моделей, используют в качестве таких моделей линейные модели, а прогноз значения частоты стандартов частоты вычисляется на основе разделения исследуемого процесса изменения частоты на две составляющие: детерминированную (линейный тренд частоты) и стохастическую, описываемую процессом скользящего среднего первого порядка [3, 4, 6].

Авторами статьи разработан алгоритм [5, 9–11], использующий более общий класс математических моделей: модели, описывающие детерминированные тренды более высокого порядка (нелинейные тренды частоты); динамические стохастические модели (модели авторегрессии – скользящего среднего (АРСС)), порядок авторегрессии которых $-p$, а скользящего среднего $-q$. В частности, предлагаемый в работе [5] алгоритм субоптимальной фильтрации, позволяющий находить оценку вектора состояния группового ЭВиЧ по результатам «внутренних сличений», опирается на использование прогнозирующих моделей АРСС, описывающих процессы изменения частоты водородных стандартов, составляющих техническую основу отечественных ЭВиЧ. Методика построения моделей АРСС по результатам косвенных измерений, выполняемых в ЭВиЧ, изложена в работах [9, 10, 12]. В настоящее время раз-

работано программное обеспечение, позволяющее полностью автоматизировать процесс построения моделей АРСС и использующее формализованные методики построения моделей, описывающих процессы изменения частоты водородных генераторов, не содержащие интерактивных процедур, требующих участия в процессе построения моделей опытных специалистов [11].

Однако для построения таких моделей необходимо иметь эмпирические временные ряды, являющиеся реализацией процессов изменения частоты, которые получаются в ходе статической обработки данных. Длина таких временных рядов, по оценке специалистов, имеющих большой опыт работы в этой области [13–15], должна быть не менее ста точек. Необходимость накопления этих данных приводит к значительной временной задержке при первоначальном вводе аппаратных средств в состав группового эталона. Естественным выходом из данной ситуации является использование адаптивных методов.

Цель настоящей работы – сократить временную задержку, связанную с накоплением информации, необходимой для построения моделей, применяя адаптивные процедуры, позволяющие подстраивать параметры прогнозирующих моделей в темпе поступления результатов измерений, получаемых в процессе функционирования эталона. Кроме того, предлагаемый подход поможет избежать перенастройки моделей, отдаляя момент «разладки» моделей.

Проблемам адаптивного управления и идентификации динамических моделей в настоящее время уделяется повышенное внимание. В частности, в работах [16–18] изложены результаты, полученные при решении задач адаптивной идентификации в режиме реального времени. В данной работе для решения проблемы адаптации прогнозирующих моделей используется метод стохастического квазиградиента [19, 20].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ЭВиЧ являются групповыми эталонами, в состав которых входит n мер – стандартов частоты и времени. В отечественных эталонах это водородные генераторы периодических сигналов. В процессе эксплуатации эталонов производятся периодические измерения разностей частоты сигналов, воспроизводимых каждым из генераторов. При этом основной измерительной схемой чаще всего является схема «каждый с опорным», когда один из генераторов выбирается в качестве опорного, и через определенные интервалы времени производятся сличения частот. По результатам выполненных измерений находятся оценки частоты (относительных отклонений частоты от приписанных им ранее значений). Зная эти оценки, можно вычислить поправки к показаниям часов каждого из генераторов и сформировать аналитическую шкалу времени группового эталона [4, 6].

Под вектором состояния таких систем будем понимать значения относительных отклонений частоты стандартов, входящих в состав эталонов. Задачу оценивания их состояния можно формулировать как задачу параметрической оптимизации стохастических систем: восстановить (оценить) вектор состояния системы на основе использования математических моделей.

Введем следующие обозначения [5]: y_s^i – относительное отклонение частоты водородного генератора (стандарта) с номером i ($i = 1, 2, \dots, n$) на такте s ($s = 1, 2, \dots, N$) от приписанного значения; n – число стандартов, входящих в эталон; N – объем накопленных данных (длина временного ряда); $z_s^i = y_s^1 - y_s^i$ – измеренные разности частот опорного и i -го генераторов на такте s (в качестве опорного генератора будем считать генератор с номером 1, что не меняет общности рассуждений); \mathbf{Z}_s – вектор измерений, выполненных на такте s ; \mathbf{Y}_s – вектор относительных отклонений частоты группового

эталона на такте s ; $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}$ – матрица измерений.

В данной работе будем рассматривать задачу обработки данных, получаемых на суточных интервалах. В этом случае погрешностями измерений можно пренебречь [4–6].

Тогда измерительная система группового ЭВиЧ (точнее, подсистема внутренних сличений эталона) может быть описана матричным уравнением

$$\mathbf{Z}_s = \mathbf{H} \cdot \mathbf{Y}_s. \quad (1)$$

Система уравнений (1) – недоопределенная (ранг матрицы \mathbf{H} равен $n - 1$). Задача обработки данных, получаемых на одном такте s , может быть сформулирована следующим образом: по результатам косвенных измерений (вектор \mathbf{Z}_s) найти оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{Y}}_s$, наилучшие в некотором смысле.

Оценки метода наименьших квадратов (МНК-оценки) находятся в данном случае с помощью псевдообратной матрицы [5]. При этом оценка опорного (первого в нашем случае) генератора равна

$$\hat{y}_s^1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} g^i z_s^i,$$

где g^i – вес i -го измерения.

Оценки остальных составляющих вектора $\hat{\mathbf{Y}}_s$ можно найти из выражения $\hat{\mathbf{Y}}_s = \mathbf{H}^+ \cdot \mathbf{Z}_s$, где \mathbf{H}^+ – псевдообратная матрица, либо непосредственно из результатов измерений z_s^i и найденной оценки \hat{y}_s^1 .

Используя динамические свойства объекта, можно получить более точные оценки вектора его состояния. Например, оценка первой составляющей вектора состояния $\hat{\mathbf{Y}}_s$ (т. е. оценка частоты опорного генератора) находится в процессе субоптимальной фильтрации [5] по формуле

$$\hat{y}_s^1 = \sum_{i=1}^n g^i (z_s^i + \hat{y}_s^i(1)), \quad (2)$$

где $\hat{y}_s^i(1)$ – прогноз частоты i -го генератора на один шаг вперед на такте s . Полученные в выражении (2) оценки имеют погрешность меньшую, нежели погрешность МНК-оценок, примерно на 30 % [3, 5, 9].

В выражении (2) индекс суммирования i начинается с единицы, так как под знак суммы входит «фиктивное» измерение $z_s^1 = y_s^1 - y_s^1 \equiv 0$. Веса g^i берутся обратно пропорциональными остаточным дисперсиям $\hat{\sigma}_i^2$, характеризующим точность прогноза. Прогнозы $\hat{y}_s^i(1)$ вычисляются на основе математических моделей, описывающих процессы изменения частоты водородных стандартов – моделей авторегрессии – скользящего среднего (АРСС), т. е. динамических стохастических моделей [15].

В общем случае параметры моделей АРСС одномерного временного ряда представляются в виде вектора $\boldsymbol{\beta}^T = [\boldsymbol{\Phi}^T; \boldsymbol{\Theta}^T]$, где $\boldsymbol{\Phi}^T = [\varphi^1, \varphi^2, \dots, \varphi^p]$ – вектор коэффициентов авторегрессии (АР), $\boldsymbol{\Theta}^T = [\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^q]$ – вектор коэффициентов скользящего среднего (СС), p – порядок АР, q – порядок СС [5].

Прогнозы вычисляются как скалярное произведение вектора параметров модели $\boldsymbol{\beta}^T = [\boldsymbol{\Phi}^T; \boldsymbol{\Theta}^T]$ на вектор состояния процесса [5] $\hat{\mathbf{Y}}^T = [\hat{y}_{s-1}, \dots, \hat{y}_{s-p}, a_{s-1}, \dots, a_{s-q}]$, где a_s – ошибки прогноза. Таким образом, прогноз на один шаг вперед $\hat{y}_s(1)$ равен $\hat{y}_s(1) = \boldsymbol{\beta}^T \hat{\mathbf{Y}} = \hat{\mathbf{Y}}^T \boldsymbol{\beta}$.

Процесс подгонки или построения прогнозирующих моделей заключается в минимизации суммы квадратов отклонений прогнозов частоты от их истинных значений. В общем случае (для многомерного временного ряда) целевая функция $F(\boldsymbol{\beta})$ запишется при этом как

$$F(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{s=1}^N \sum_{i=1}^n (y_s^i - \hat{y}_s^i(1))^2. \quad (3)$$

Уидроу [21], рассматривая работу фазированной антенной решетки в режиме подстройки параметров модели, описывает ее с помощью дискретного адаптивного сумматора. При этом проблема адаптации весовых коэффициентов фильтра в стационарном режиме формулируется как оптимизационная задача.

В нашем случае, т. е. при использовании моделей АРСС, такую ситуацию можно толковать как процесс подстройки параметров прогнозирующей модели, коэффициенты φ_s^{ik} и θ_s^{ij} которой оценивались по ограниченной выборке ($k = 1, 2, \dots, p^i$; $j = 1, 2, \dots, q^i$; p^i и q^i – порядки АР и СС модели i -го генератора). То есть речь может идти о применении стохастических квазиградиентных методов [19, 20].

2. МЕТОД СТОХАСТИЧЕСКОГО КВАЗИГРАДИЕНТА

Методы адаптации математических моделей разработаны в рамках теории стохастических систем. Одним из наиболее широко применяемых методов является метод стохастического квазиградиента [19].

Цель адаптации – минимизировать сумму квадратов отклонений прогнозов частоты от их истинных значений.

Целевая функция (3) является выпуклой, т. е. непрерывной и ограниченной [10]. Поэтому обобщенный градиент (квазиградиент) будет совпадать с обычным градиентом [19]

$$\bar{\nabla}F(\boldsymbol{\beta}) = -2 \sum_{s=1}^N \sum_{i=1}^n a_s^i \hat{Y}_s^i,$$

где \hat{Y}_s^i , a_s^i – вектор оценок состояния процесса и ошибка прогноза i -го генератора на такте s соответственно. Поскольку для групповых ЭВиЧ выполняется требование независимости значений частот, воспроизводимых разными генераторами, друг от друга, то можно рассматривать модели одномерных временных рядов и процедуру их адаптации. Метод стохастического градиента в данном случае сведется к построению последовательности точек [20]:

$$\boldsymbol{\beta}_{s+1} = \pi_{\beta} \left[\boldsymbol{\beta}_s - \rho_s \nu_s (-1) (-a_s \hat{Y}_s) \right], \quad (4)$$

где π_{β} – оператор проектирования вектора параметров $\boldsymbol{\beta}$ в область допустимых значений; ρ_s – величина шага на такте s ; ν_s – нормирующий множитель (m -норма вектора \hat{Y}_s). В выражении (4) множитель «минус 1» обусловлен движением в направлении антиградиента, ρ_s выбирается из условия сходимости процесса адаптации [19, 22] и при $s \rightarrow \infty$ удовлетворяет условию $\rho_s \rightarrow 0$, т. е. $\rho_s = 1/s$.

В требованиях, предъявляемых к коэффициенту ρ_s , опущено условие $\sum_{s=1}^{\infty} \rho_s = \infty$, поскольку мы не рассматриваем задачу нахождения вектора $\boldsymbol{\beta}$ при любых начальных условиях (т. е. из любой точки пространства параметров), ограничиваясь лишь проблемой «подстройки» начальной оценки вектора параметров.

Таким образом, можно определить величину коэффициента адаптации как функцию такта s следующим образом:

- 1) устанавливаем начальное значение коэффициента ρ_0 ;
- 2) на последующих тактах «обучения» модели полагаем $\rho_s = \frac{1}{s}$;
- 3) после окончания процесса «обучения» модели полагать ρ_s постоянным.

Выбор начального значения коэффициента ρ_0 зависит от того, какой режим адаптации рассматривается. Будем различать два режима: режим подстройки параметров модели АРСС и режим их перенастройки. «Режим под-

стройки» предполагает первоначальную оценку параметров модели по короткому временному ряду длиной l с последующей их корректировкой. При этом веса равны $\rho_k = \frac{1}{k}$ ($k = l+1, l+2, \dots$). При обнаружении «разладки модели» необходимо устанавливать коэффициент ρ_0 «в единицу».

Рассмотрим процедуру адаптации, описываемую выражением (4), на простейшем примере. Пусть все значения временного ряда y^j лежат в положительной полуплоскости. Случайный процесс, описываемый временным рядом, – процесс авторегрессии первого порядка с положительным коэффициентом φ^{11} . Пусть начальное значение $\hat{\varphi}_0^{11} > \varphi^{11}$, тогда ошибка прогноза – отрицательная величина. Градиент на такте s отрицательный. Движение идет в направлении антиградиента, в результате поправка к коэффициенту $\hat{\varphi}_s^{11}$ будет отрицательной. То есть значения коэффициента $\hat{\varphi}_s^{11}$ будут убывать до тех пор, пока на текущем такте s оценка $\hat{\varphi}_s^{11}$ не станет меньше истинного значения этой величины. После этого знаки поправки будут чередоваться, как в процедуре стохастической аппроксимации [22].

Процесс адаптации прогнозирующих моделей иллюстрируется следующим примером. Временной ряд, имитирующий процесс изменения относительного отклонения частоты водородного стандарта, был сгенерирован при следующих исходных данных: $y_1 = 0$, $\varphi^1 = 0.5$, $\sigma_a = 0.5$ (σ_a – среднее квадратическое отклонение белого шума, «возбуждающего систему»; y_1 – начальное значение ряда). Длина временного ряда составляла 150 точек. Оценка параметра $\hat{\varphi}_{150}^1$, полученная при анализе всей выборки, равна 0.529. Это значение и будем считать «истинным значением» коэффициента φ^1 .

Оценка параметра $\hat{\varphi}_{50}^1$, полученная по начальному отрезку временного ряда, состоящему из 50 точек, равна 0.69. Процесс адаптации, показанный на рис. 1, начинается с этого значения параметра, идет в нужном направлении и сходится к «истинному значению».

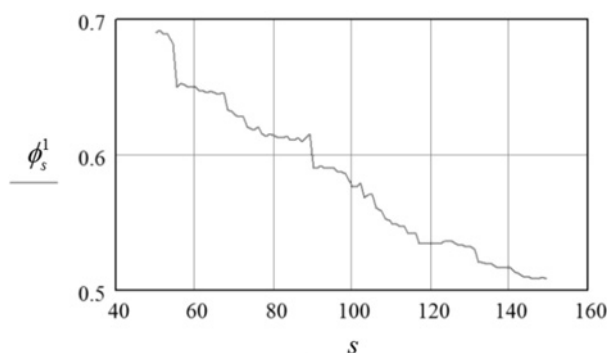


Рис. 1. Пример адаптации коэффициента φ^1

Fig. 1. An example of the coefficient φ^1 adaptation

Адаптация начиналась с 51-й точки сгенерированного ряда. Начальное значение коэффициента ρ равнялось $\frac{1}{51}$. Квадраты остатков от прогноза убывают достаточно быстро до значения, примерно равного 0.25, что соответствует среднему квадратическому отклонению шума, возбуждающего систему.

3. АДАПТАЦИЯ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОМЕРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Приведенные выше результаты получены при упрощенном подходе к процедуре адаптации. Во-первых, использовалась одномерная модель АРСС, тогда как на самом деле в групповой эталон входит несколько водородных генераторов, т. е. необходимо рассматривать модели многомерных временных рядов. Во-вторых, что значительно важнее для использования предлагаемого метода при работе с реальным объектом, в распоряжении исследователя нет «истинных» значений временного ряда y_s , а есть только результаты измерений, т. е. вектор $\mathbf{z}_s^T = [y_s^1 - y_s^2, \dots, y_s^1 - y_s^n]$.

Всё вышесказанное приводит к необходимости обобщения полученных результатов для многомерных моделей. С учетом сделанных замечаний сформулируем задачу адаптации моделей временных рядов, используемых в процессе функционирования групповых эталонов.

На текущем такте s имеем: результаты измерений $z^i = y^1 - y^i$; вектор прогнозов измерений, вычисленный на предыдущем такте, $\hat{\mathbf{z}}_s(\mathbf{1})^T = [\hat{z}_s^1(1), \hat{z}_s^2(1), \dots, \hat{z}_s^n(1)]$, где $\hat{z}_s^i(1) = (\mathbf{X}_s^i)^T \boldsymbol{\beta}_s^i$ – прогноз результата измерений с i генератором; $(\mathbf{X}_s^i)^T$ – транспонированный подвектор состояния процесса АРСС i временного ряда [2]; $\boldsymbol{\beta}_s^i$ – подвектор параметров i -й модели АРСС. В этом случае вектор состояния многомерного процесса АРСС будет представлен в виде

$$\mathbf{X}_s^T = \left[\hat{y}_{s-1}^1, \dots, \hat{y}_{s-p^1}^1, \dots, a_{s-1}^1, \dots, a_{s-q^1}^1, \dots, \hat{y}_{s-1}^n, \dots, \hat{y}_{s-p^n}^n, \dots, a_{s-1}^n, \dots, a_{s-q^n}^n \right],$$

где \hat{y}_{s-j}^i – оценка величины y^i на шаге $s-j$; p^i, q^i – порядки процессов АР и СС в моделях АРСС i -го элемента группового эталона. Соответственно расширенный вектор параметров моделей АРСС – $\boldsymbol{\beta}^T = [(\boldsymbol{\beta}^1)^T; (\boldsymbol{\beta}^2)^T; \dots; (\boldsymbol{\beta}^n)^T]$.

Задача адаптации заключается в построении вектора параметров $\boldsymbol{\beta}$ многомерной прогнозирующей модели, минимизирующего целевую функцию

$$F(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{s=1}^N \sum_{i=1}^n (z_s^i - \hat{z}_s^i(1))^2, \quad (5)$$

где $\hat{z}_s^i(1)$ – прогноз результата i -го измерения на такте s , вычисляется как разность прогнозов 1-го и i -го генераторов.

В развернутом виде выражение (5) записывается как

$$F(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{s=1}^N \sum_{i=1}^n \left(z_s^i - (\mathbf{X}_s^i)^T \boldsymbol{\beta}_s^i \right)^2,$$

где $(\mathbf{X}_s^i)^T = \left[\hat{y}_{s-1}^1, \hat{y}_{s-2}^1, \dots, \hat{y}_{s-p^1}^1, a_{s-q^1}^1, -\hat{y}_{s-1}^i, -\hat{y}_{s-2}^i, \dots, -\hat{y}_{s-p^i}^i, -a_{s-q^i}^i \right]$ – расширенный вектор состояния процессов АРСС для 1-го и i -го генераторов; $(\boldsymbol{\beta}_s^i)^T = \left[\varphi_s^{11}, \dots, \varphi_s^{1p^1}, -\theta_s^{11}, \dots, -\theta_s^{1q^1}, \varphi_s^{i1}, \dots, \varphi_s^{ip^i}, -\theta_s^{i1}, \dots, -\theta_s^{iq^i} \right]$ – расширенный вектор параметров моделей 1-го и i -го генераторов.

В выражении (5) полагаем $z_s^1 = 0$ при $s = 1, \dots, N$, если опорным является 1-й генератор. В этом случае в целевую функцию (5) для опорного генератора включается лишь прогноз его частоты.

Подробно процедура адаптации многомерных моделей временных рядов, имитирующих процессы изменения относительных отклонений частоты водородных стандартов, входящих в групповые ЭВиЧ, рассмотрена в работе [23]. Здесь приведем лишь результаты машинных экспериментов.

При моделировании генерировались три временных ряда, соответствующих моделям авторегрессии 1-го порядка с коэффициентами $\varphi^{11} = 0.8$, $\varphi^{21} = 0.3$ и $\varphi^{31} = 0.5$.

Среднее квадратическое отклонение белого шума, возбуждающего систему, полагалось равным $\sigma = 0.1$ для всех трех рядов. По сгенерированным временным рядам, состоящим из 250 точек, получены следующие оценки параметров моделей: $\hat{\varphi}_{250}^{11} = 0.827$, $\hat{\varphi}_{250}^{21} = 0.323$ и $\hat{\varphi}_{250}^{31} = 0.527$. Затем, считая, что в распоряжении исследователей имелась выборка ограниченной длины (для определенности полагалось, что выборки состоят из 50 членов каждого ряда), вычислялись оценки параметров моделей АР (1): $\hat{\varphi}_{50}^{11} = 0.5$, $\hat{\varphi}_{50}^{21} = 0.1$ и $\hat{\varphi}_{50}^{31} = 0.48$.

С момента $k = 51$ начинался процесс адаптации, т. е. подстройки коэффициентов φ^{i1} ($i = 1, 2, 3$). При этом начальное значение шага ρ_0 полагалось равным $\frac{1}{51}$.

На рис. 2 и 3 приведены графики изменения параметров авторегрессии для каждого из трех рядов и суммы квадратов ошибок от прогнозов.

Численные эксперименты, выполненные в процессе исследования адаптивных процедур с моделями многомерных временных рядов, позволяют сделать следующие выводы.

1. Как видно из рис. 2, процесс адаптации, двигаясь в правильном направлении, все же не позволяет достичь истинных значений коэффициентов АР. При этом задача минимизации целевой функции (5) успешно решает-

ся (рис. 3). Данное противоречие только кажущееся. В монографии [13] приведены графики линий равного уровня для сумм квадратов остатков, получающихся при подгонке коэффициентов модели временного ряда с двумя параметрами (φ^1 и φ^2). Из этих графиков видно, что задачи идентификации и «подгонки» коэффициентов авторегрессии – скользящего среднего методом наименьших квадратов имеют множество почти эквивалентных решений. На это было обращено внимание при проведении соответствующих работ по исследованию алгоритмов обработки измерительной информации, получаемой в эталонах времени и частоты [9].

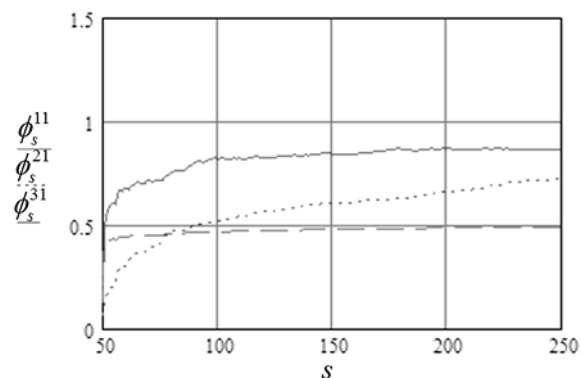


Рис. 2. Процесс адаптации коэффициентов авторегрессии многомерных моделей временных рядов

Fig. 2. The process of adapting the autoregression coefficients of multidimensional time series models

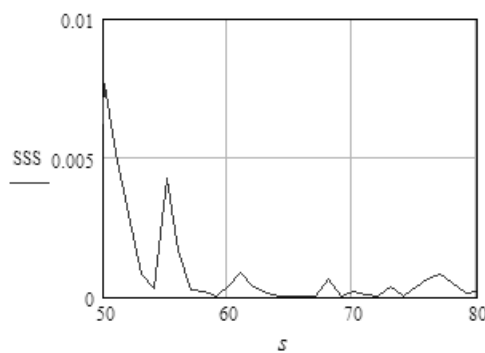


Рис. 3. Квадраты ошибок прогнозов вектора измерений

Fig. 3. Squared errors of measurement vector forecasts

2. При моделировании исследовался процесс подстройки коэффициентов авторегрессии φ^{i1} ($i=1, 2, 3$) трех временных рядов при нулевых начальных значениях φ_0^{i1} . Процесс носит примерно такой же характер, как и рассмот-

ренный выше. При этом установившиеся (или почти установившиеся к конечному такту адаптации) значения коэффициентов $\hat{\phi}^{11}$, $\hat{\phi}^{21}$, $\hat{\phi}^{31}$ (далее в смысле нормы разности векторов β) отстоят от оценок, полученных по «истинным» (т. е. сгенерированным) рядам.

Из вышесказанного следует, что адаптация ни в коем случае не может подменять процедуру идентификации недоопределенных систем, детально рассмотренных в работе [9], а может служить только как дополнение (весьма важное) к алгоритму динамической обработки данных [5].

4. АДАПТАЦИЯ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ТРЕНДОВ

Рассмотренные выше процедуры адаптации относятся к рядам, не содержащим детерминированных трендов. В общем случае временные ряды могут быть представлены следующей математической моделью

$$y_s = A_s + B_s + C_s, \quad (6)$$

где A_s – детерминированный тренд; B_s – сезонная составляющая; C_s – случайная составляющая; $s = 1, 2, \dots$ – дискретное время. При анализе реальных временных рядов, описывающих процессы изменения частоты водородных генераторов, сезонные составляющие не обнаружены [9]. Поэтому член B_s можно исключить из модели (6). Таким образом, мы представляем исследуемый процесс как сумму двух составляющих: C_s – процесс АРСС, A_s – детерминированный тренд.

Будем рассматривать процедуру адаптации временных рядов, содержащих линейные тренды. Это, во-первых, в большинстве случаев не противоречит реальности [9], а во-вторых, расширение полученных результатов на тренды, описываемые полиномами более высоких порядков, не представляет трудности.

Известно, что процедура подстройки вектора параметров β и коэффициентов линейного тренда b_0 и b_1 должна проводиться отдельно. Это следует из того, что рассматриваемая задача может быть отнесена к классу задач стохастического программирования со сложными функциями регрессии [19]. При этом в обязательном порядке необходима отдельная корректировка коэффициентов авторегрессии – скользящего среднего и оценок b_0 и b_1 . Более того, как показано в работе [15], при идентификации систем, содержащих детерминированную и стохастическую составляющие, невозможно получение однозначного решения поставленной задачи. В нашем случае это очевидно: возможно бесчисленное множество комбинаций параметров детерминированного тренда и составляющих вектора β , доставляющих минимум функции потерь.

В дальнейшем, говоря о параметрах тренда, будем учитывать только коэффициент b_1 . Влияние члена b_0 можно не учитывать, так как в реальных системах информацию о его величине можно получить с помощью «внешних сличений» эталона.

Пример временного ряда, содержащего линейный тренд, приведен на рис. 4. Ряд был сгенерирован на основе модели «формирующего фильтра». При этом на детерминированный тренд с углом наклона (коэффициент b_1), равным 0.03, был наложен процесс авторегрессии первого порядка. Коэффициент φ^1 при этом полагался равным 0.5. Среднее квадратическое отклонение «белого шума», возбуждающего систему, равно 0.5.

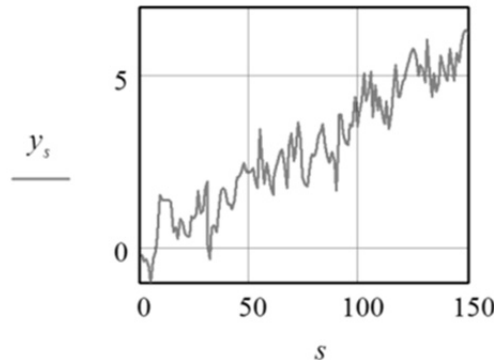


Рис. 4. Временной ряд, полученный наложением процесса авторегрессии первого порядка на линейную функцию

Fig. 4. The time series obtained by imposing the first-order autoregression process on the linear function

Прежде чем производить адаптацию полученного временного ряда, были проведены эксперименты по отдельной адаптации двух переменных рядов: ряд, содержащий только процесс авторегрессии с заданным φ^1 , и временной ряд, содержащий детерминированный тренд с аддитивным шумом. Первый эксперимент описан выше в настоящей работе (рис. 1). Процесс подстройки коэффициента b_1 , определяющего угол наклона детерминированного тренда, проводился в соответствии с рекомендациями Ю.М. Ермольева при описании процедуры адаптации со сложной функцией регрессии [19]. Эти рекомендации полностью совпадают с требованиями метода стохастической аппроксимации (процедура Роббинса–Монро) [22]. При этом коррекция величины b_1 пропорциональна погрешности прогноза текущего члена ряда.

Вес ρ_s (или коэффициент адаптации) равен $\frac{1}{s}$. Как и ожидалось, эксперимент также дал положительные результаты.

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие замечания к общей процедуре адаптации моделей временных рядов, содержащих детерминированные линейные тренды.

1. Общий прогноз временного ряда, содержащего детерминированный тренд с наложенным на него процессом АРСС, должен содержать сумму прогнозов, обусловленных этими составляющими.

2. Для вычисления составляющей прогноза, обусловленной детерминированным трендом, достаточно иметь оценку коэффициента b_1 , вычисленную на предыдущем такте.

3. Для вычисления составляющей прогноза, обусловленной процессом авторегрессии первого порядка, требуется знать текущее состояние этого процесса.

Последний пункт крайне важен, так как подразумевает возможность разбиения временного ряда y_s на две составляющие. Для решения этой задачи была предложена следующая методика.

Шаг 1. Проводится статистический анализ начального участка временного ряда y_s , имеющегося в распоряжении исследователя. При этом строится функция линейной регрессии $y_s = b_1 \cdot s$ (по указанным выше причинам коэффициент b_0 в модель не включается).

Шаг 2. Из исходного ряда y_s (на начальном участке) удаляется линейная функция. Для оставшейся составляющей ряда строится динамическая стохастическая модель (модель АРСС).

Шаг 3. В процессе адаптации вычисляются прогнозы обеих составляющих ряда y_s . Общий прогноз находится их суммированием. Ошибка прогноза Δy_s находится как разность между «истинным» значением ряда y_s и его прогнозом $\hat{y}_{s-1}(1)$, вычисленным на предыдущем такте.

Шаг 4. Ошибка прогноза Δy_s делится на две составляющие: ошибка, обусловленная погрешностью оценки угла наклона линейного тренда, и ошибка, вызванная погрешностью оценки стохастической составляющей.

Для выполнения этой операции воспользуемся результатами статистического анализа, проведенного на начальном участке временного ряда. При построении линейной регрессии и моделей АРСС находят суммы квадратов остатков, полученные на конечном этапе построения моделей. Так как эти суммы пропорциональны остаточным дисперсиям, то веса, определяющие долю каждой составляющей процесса y_s в общей ошибке прогноза, должны быть пропорциональны этим дисперсиям (по существу, мы решаем задачу, обратную задаче объединения неравноточных измерений, что и обусловило такой подход к определению весов. Разумеется, сумма весов должна равняться единице).

Значение текущей составляющей стохастического процесса находится как сумма прогноза этого процесса и его ошибки.

Характер процесса подстройки коэффициента ϕ^1 практически ничем не отличается от процесса, представленного на рис. 1. Коэффициент b_1 изменяется в процессе его подстройки от начального значения 0.0376 до 0.0384 («истинное» значение $b_1 = 0.039$). То есть абсолютная погрешность оценки уменьшилась в два раза.

Переход к многомерным моделям временных рядов при наличии детерминированных трендов не представляет принципиальных трудностей.

Так как ряды относительных отклонений частоты водородных генераторов не коррелированы (во всяком случае, это требование должно выполняться для эталонов, функционирующих в нормальном режиме), можно произве-

сти декомпозицию вектора Y_s на отдельные составляющие и рассматривать полученные ряды оценок \hat{y}_s^i в качестве «истинных» значений y^i . Следовательно, все рассмотренные выше положения можно применить к адаптации многомерных моделей, содержащих детерминированные тренды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Погрешность оценивания вектора состояния группового ЭВиЧ может быть уменьшена за счет применения алгоритмов обработки данных, опирающихся на использование прогнозирующих моделей, в том числе моделей АРСС. Для построения моделей АРСС необходимы эмпирические данные (временные ряды, описывающие процессы изменения частоты водородных стандартов, входящих в состав группового ЭВиЧ). Необходимость накопления эмпирических данных приводит к временным задержкам с момента введения нового стандарта в состав эталона до начала использования результатов измерений, выполненных с участием этого стандарта в системе формирования шкалы времени группового эталона.

С целью уменьшения указанной выше задержки в работе предложена методика обработки данных, основанная на построении прогнозирующих моделей по укороченным временным рядам с последующей адаптацией моделей по мере поступления текущих результатов измерений. Адаптация вектора параметров прогнозирующих моделей выполняется методом стохастического квазиградиента.

Численные эксперименты показали работоспособность предложенной методики. Процедура адаптации позволяет проводить подстройку параметров прогнозирующих моделей (одномерных и многомерных). Метод адаптации работает также и в ситуации, когда на случайный процесс наложен детерминированный тренд.

Применение предложенной методики позволяет значительно сократить этап первоначального накопления данных, уменьшая задержку между моментом включения в состав группового эталона новых генераторов почти вдвое. Изложенные результаты можно применять к различным информационно-измерительным системам, в которых результаты измерений представлены в виде временных последовательностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panfilo G., Harmegnies A., Tisserand L.* A new prediction algorithm for the generation of International Atomic Time // *Metrologia*. – 2012. – Vol. 49. – P. 49–56.
2. *Percival D.B., Senior K.L.* A wavelet-based multiscale ensemble time-scale algorithm // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency*. – 2012. – Vol. 59, N 3. – P. 510–522.
3. An algorithm for a group time scale using a moving average over multiple time / *S.D. Podogova, K.G. Mishagin, S.Yu. Medvedev, I.Yu. Blinov* // *Measurements Techniques*. – 2015. – Vol. 58, N 5. – P. 532–538.
4. *Levine J.* The statistical modeling of atomic clocks and the design of timescales // *Review of Scientific Instruments*. – 2012. – Vol. 83. – Art. 021101. – P. 1–28.
5. *Khrustalev Yu.P.* Statistical and dynamic processing of data obtained when handling time and frequency standards // *Measurement Techniques*. – 2004. – Vol. 47, N 6. – P. 555–561.

6. Безменов И.В., Блинов И.Ю. Теоретические основы построения моделей для описания современных шкал времени и стандартов частоты: монография. – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2015. – 529 с.
7. Greenhall C.A. Reduced Kalman filters for clock ensembles // 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & European Frequency and Time Forum: Proceedings. – San Francisco, CA, 2011. – P. 1–5.
8. Suess M., Greenhall C.A. Combined covariance reductions for Kalman filter composite clocks // Metrologia. – 2012. – Vol. 49. – P. 588–596.
9. Обработка данных, полученных по результатам взаимных измерений вторичного эталона времени и частоты / Ю.П. Хрусталева, В.М. Акулов, А.А. Ипполитов, Л.Н. Курьшева // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 7 (66). – С. 22–28.
10. Хрусталева Ю.П., Серышева И.А. Автоматизация процесса построения динамических стохастических моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 9. – С. 95–103.
11. Метод сопряженных градиентов в системе автоматического построения динамических стохастических моделей / И.А. Серышева, М.А. Чебан, Л.В. Бархатова, Е.А. Крупнев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 8. – С. 72–82.
12. Khrustalev Yu.P., Serysheva I.A. Increasing of robustness of estimators of the state of time and frequency standards // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 57, N 5. – P. 519–525.
13. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: прогноз и управление. Вып. 1 / пер. с англ. А.Л. Левшина; под ред. В.Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
14. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 288 с.
15. Кашьян Р.Л., Рао А.Р. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
16. Ovcharenko V.N. Adaptive parameter identification in dynamical and static systems // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72, N 3. – P. 570–579.
17. Druzhinina M.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. Methods of nonlinear adaptive control with respect to the output // Automation and Remote Control. – 1996. – Vol. 57, N 2. – P. 153–176.
18. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. – М.: ЛКИ, 2008. – 384 с.
19. Ермолов Ю.М. Методы стохастического программирования. – М.: Наука, 1976. – 239 с.
20. Серышева И.А., Хрусталева Ю.П. Метод стохастического квазиградиента в задаче адаптации прогнозирующих моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 12 (83). – С. 25–30.
21. Стационарные и нестационарные характеристики обучения адаптивных фильтров, использующих критерии минимума СКО / Б. Уидроу, Дж.М. Маккул, М.Г. Ларимор, С.Р. Джонсон // ТИИЭР. – 1976. – Т. 64, № 8. – С. 37–51.
22. Невельсон М.Б., Хасминский Р.З. Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание. – М.: Наука, 1972. – 304 с.
23. Серышева И.А., Хрусталева Ю.П. Адаптация многомерных динамических стохастических моделей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 2 (42). – С. 78–84.

Серышева Ирина Анатольевна, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – обработка измерительной информации. Имеет более 45 публикаций. E-mail: sia_cyber@mail.ru

Хрусталева Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – динамические стохастические модели в системах обработки частотно-временной информации. Имеет более 50 публикаций. E-mail: khrustalev@istu.irk.ru

Serysheva Irina Anatolievna, a senior lecture at the department of automated system, Irkutsk National Research Technical University. Her research interests include measurement data processing. She is the author of more than 45 publications. E-mail: sia_cyber@mail.ru

Khrustalev Yuri Petrovich, PhD (Eng.), an associate professor at the department of computer engineering, Irkutsk National Research Technical University. His research interests are focused on dynamic stochastic models in systems of frequency and time information processing. He has published more than 50 research papers. E-mail: khrustalev@istu.irk.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-107-124

Adaptive time series models in the measurement data processing systems*

I.A. SERYSHEVA^a, YU.P. KHRUSTALEV^b

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation

^a sia_cyber@mail.ru ^b khrustalev@istu.irk.ru

Abstract

The accuracy of modern information-measuring systems is caused by both measuring schemes and data processing algorithms. In this paper the issues of reducing an algorithmic error of group standards of time and frequency which can be treated as complex information-measuring systems are considered.

The estimation error of the state vector of standard can be reduced by 15-20 percent due to the use of more advanced algorithms for processing measurement information, in particular, through the use of algorithms based on the use of dynamic stochastic models. However, empirical time series containing, at least, no less than a hundred elements are necessary for creating such models. When processing data obtained on daily intervals, this leads to delays of approximately one quarter between the moment of including a new standard in the structure of the group standard and the beginning of using the measurement results obtained with its help. A natural way of reducing this temporary delay consists in creating predictive models for a shortened time series with their subsequent adaptation in the process of obtaining new measurement results.

The article proposes to use the method of a stochastic quasi-gradient which is designed to create a sequence of points in the parameter space of dynamic stochastic models for the adaptation of time series models describing processes of changing relative frequency deviations of hydrogen generators which form the basis of Russian standards of time and frequency. The adaptation algorithm realizing the proposed method is considered. The results of the computational experiment are presented confirming the efficiency of the method when adapting a one-dimensional time series model. The results obtained are generalized for multidimensional models and also for the adaptation of predictive time series models containing deterministic trends along with a stochastic component.

The approach proposed by the authors allows cutting almost by half the temporary delay caused by the accumulation of initial data necessary for creating predictive models used for the estimation of a group standard state.

Keywords: dynamic stochastic models, time series, group standards of physical quantities, adaptive models, stochastic approximation, stochastic quasi-gradient, autoregressive moving-average models, model parameter space, adaptation of predictive models

* Received 14 November 2018.

REFERENCES

1. Panfilo G., Harmegnies A., Tisserand L. A new prediction algorithm for the generation of International Atomic Time. *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 49–56.
2. Percival D.B., Senior K.L. A wavelet-based multiscale ensemble time-scale algorithm. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency*, 2012, vol. 59, N 3, pp. 510–522.
3. Podogova S.D., Mishagin K.G., Medvedev S.Yu., Blinov I.Yu. An algorithm for a group time scale using a moving average over multiple time. *Measurements Techniques*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 532–538.
4. Levine J. The statistical modeling of atomic clocks and the design of timescales. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83, art. 021101, pp. 1–28.
5. Khrustalev Yu.P. Statistical and dynamic processing of data obtained when handling time and frequency standards. *Measurement Techniques*, 2004, vol. 47, no. 6, pp. 555–561.
6. Bezmenov I.V., Blinov I.Yu. *Teoreticheskie osnovy postroeniya modelei dlya opisaniya sovremennykh shkal vremeni i standartov chastoty* [Theoretical bases of building of models for the description of modern time scales and frequency standards]. Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2015. 529 p.
7. Greenhall C.A. Reduced Kalman filters for clock ensembles. *2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & European Frequency and Time Forum: Proceedings*, San Francisco, CA, 2011, pp. 1–5.
8. Suess M., Greenhall C.A. Combined covariance reductions for Kalman filter composite clocks. *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 588–596.
9. Khrustalev Yu.P., Akulov V.M., Ippolitov A.A., Kurysheva L.N. Obrabotka dannykh, poluchennykh po rezul'tatam vzaimnykh izmerenii vtorichnogo etalona vremeni i chastoty [Processing data obtained as a result of reciprocal measuring of secondary standard of time and frequency]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2012, no. 7 (66), pp. 22–28.
10. Khrustalev Yu.P., Serysheva I.A. Avtomatizatsiya protsessa postroeniya dinamicheskikh stokhasticheskikh modelei [Automation of dynamic stochastic model creation process]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 9, pp. 95–103.
11. Serysheva I.A., Chekan M.A., Barkhatova L.V., Krupenev E.A. Metod sopryazhennykh gradientov v sisteme avtomaticheskogo postroeniya dinamicheskikh stokhasticheskikh modelei [Conjugate gradient method in the system of predicting model automatic creation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 8, pp. 72–82.
12. Khrustalev Yu.P., Serysheva I.A. Increasing of robustness of estimators of the state of time and frequency standards. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 5, pp. 519–525.
13. Box G.E.P., Jenkins G.M. *Time series analysis: forecasting and control*. San Francisco, Holden-Day Publ., 1970 (Russ. ed.: Boks Dzh., Dzhenkins G. *Analiz vremennykh ryadov: prognoz i upravlenie*. Vyp. 1. Moscow, Mir Publ., 1974. 406 p.).
14. Borovikov V.P. *Populyarnoe vvedenie v sovremenniy analiz dannykh v sisteme STATISTICA* [Popular introduction to modern data analysis in the STATISTICA system]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2015. 288 p.
15. Kashyap R.L., Rao A.R. *Dynamic stochastic models from empirical data*. New York, Academic Press, 1976 (Russ. ed.: Kash'yap R.L., Rao A.R. *Postroenie dinamicheskikh stokhasticheskikh modelei po eksperimental'nym dannym*. Moscow, Nauka Publ., 1983. 384 p.).
16. Ovcharenko V.N. Adaptive parameter identification in dynamical and static systems. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 3, pp. 570–579.
17. Druzhinina M.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. Methods of nonlinear adaptive control with respect to the output. *Automation and Remote Control*, 1996, vol. 57, no. 2, pp. 153–176.
18. Tyukin I.Yu., Terekhov V.A. *Adaptatsiya v nelineinykh dinamicheskikh sistemakh* [Adaptation in nonlinear dynamic systems]. Moscow, LKI Publ., 2008. 384 p.
19. Ermol'ev Yu.M. *Metody stokhasticheskogo programmirovaniya* [Methods of stochastic programming]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 239 p.
20. Serysheva I.A., Khrustalev Yu.P. Metod stokhasticheskogo kvazigradienta v zadache adaptatsii prognoziryuyushchikh modelei [Method of stochastic quasigradient in the problem of predictive model adaptation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2013, no. 12 (83), pp. 25–30.

21. Widrow B., Mccool J.M., Larimore M.G., Johnson C.R. Stationary and nonstationary learning characteristics of the LMS adaptive filter. *Trudy Instituta inzhenerov po elektronike i radioelektronike – Proceedings of the IEEE*, 1976, vol. 64, no. 8, pp. 37–51. (In Russian).

22. Nevel'son M.B., Khasminskii R.Z. *Stokhasticheskaya approksimatsiya i rekurrentnoe otsenivanie* [Stochastic approximation and recurrent estimation]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 304 p.

23. Serysheva I.A., Khrustalev Yu.P. Adaptatsiya mnogomernykh dinamicheskikh stokhasticheskikh modelei [Method of stochastic quasigradient in the task of adapting of predictive models]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2014, no. 2 (42), pp. 78–84.

Для цитирования:

Серышева И.А., Хрусталеv Ю.П. Адаптивные модели временных рядов в системах обработки измерительной информации // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 107–124. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-107-124.

For citation:

Serysheva I.A., Khrustalev Yu.P. Adaptivnye modeli vremennykh ryadov v sistemakh obrabotki izmeritel'noi informacii [Adaptive time series models in the measurement information processing systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 107–124. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-107-124.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.773.5

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-125-140

Имитационная модель оценивания вычислительной нагрузки на центральный сервер системы видеоконференц-связи*

Р.Н. ЯКОВЛЕВ

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

iakovlev.r@mail.ru

На сегодняшний день в рамках множества различных областей практической деятельности, таких как организация производства, снабжения или обслуживания, эксплуатация транспортных средств, планирование распределения кадрового состава, планирование поставок ресурсов и оборудования, формируется множество задач, при решении которых широкое распространение получило применение имитационных моделей.

В рамках данного исследования была разработана модель, имитирующая функционирование системы видеоконференц-связи и позволяющая проводить оценку величины нагрузки на центральный сервер данной системы. В работе представлено описание возможностей системы видеоконференц-связи, а также описание самой системы, которая предназначена для организации множества параллельных коммуникаций между различными группами пользователей. Разработанная имитационная модель учитывает различные параметры конфигурации системы и требования, предъявляемые к ней с точки зрения количества обслуживаемых пользователей, формата коммуникации, а также анализа видеопотоков. Модель позволяет на основе результатов оценки нагрузки на центральный сервер системы видеоконференц-связи рассчитать объем вычислительных мощностей, необходимый для стабильной работы системы при реализации различных сценариев функционирования. В число исследованных сценариев входило применение системы видеоконференц-связи как в небольшой компании, не предъявлявшей высоких требований к анализу переговорного процесса, так и в рамках крупной транснациональной компании, предъявляющей высокие требования к аналитике по потребителям, подключенным к системе видеоконференц-связи. Предложенное решение соответствует критериям масштабируемости и предусматривает возможность в дальнейшем учесть большее число возможных действий как со стороны пользователей, так и со стороны администраторов систем видеоконференц-связи.

Ключевые слова: информационные системы, телеконференц-связь, видеоконференц-связь, имитационное моделирование, тестирование систем, клиент-серверная архитектура, тестирование нагрузки, качество обслуживания, QoS

* *Статья получена 12 октября 2018 г.*

ВВЕДЕНИЕ

К современным информационным системам нередко выдвигается требование о возможности одновременного обслуживания тысяч или даже миллионов пользователей. В связи с этим при проектировании информационных систем, а также разработке программных продуктов нередко возникает необходимость в оценке требуемого объема вычислительных мощностей для поддержания эффективного функционирования разработанных решений. Иными словами, формируется проблема оценки ожидаемой нагрузки на вычислительные мощности со стороны разработанной системы или программного продукта. В случае, если объем доступных вычислительных мощностей оказывается недостаточным, это может повлечь за собой сбои в работе системы или даже ее полный отказ [1, 2]. Выход из строя систем подобного масштаба нередко влечет за собой серьезные издержки, связанные с потерей части аудитории, утратой пользовательских данных, а также приводит к значительным репутационным потерям (например, крах веб-сайта Firefox [3], неудачный запуск AppleMobileMe [4]).

Как правило, в целях предотвращения возникновения подобных ситуаций применяются различные техники тестирования, в частности, тестирование под нагрузкой [5], которое является обязательной процедурой тестирования для обеспечения качества подобных систем наряду с традиционными процедурами функционального тестирования, такими как, например, модульное тестирование. Подобные техники помогают идентифицировать и устранить множество проблем. Однако их применение возможно лишь при сравнительно высокой степени готовности системы [6–8]. Таким образом, в случае, если по итогам тестирования выявляется недостаток вычислительных мощностей, то затраты на масштабирование могут быть весьма велики, более того, в отдельных случаях может потребоваться даже реинжиниринг системы. В связи с этим актуальным является формирование моделей, позволяющих провести оценку ожидаемой нагрузки на вычислительные мощности со стороны системы на ранних этапах разработки, когда применение известных техник тестирования под нагрузкой еще не представляется возможным.

Таким образом, в рамках данной работы предлагается сформировать имитационную модель [9, 10] предназначенную для оценки ожидаемой величины нагрузки на центральный сервер системы видеоконференц-связи (ВКС), и осуществить ее практическую апробацию на различных имитируемых конфигурациях данной системы.

1. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ

Кросс-платформенные веб-технологии позволяют адаптировать работу системы ВКС под различные программно-аппаратные платформы и обеспечивать контроль над обычными и управляемыми аккаунтами в единообразной адаптируемой среде в режиме реального времени [11]. При этом различия в конечном продукте относительно каждой из платформ носят условный характер: логика работы веб-приложения отделена от деталей реализации аппаратной платформы, на которой оно запущено. Тем не менее при

подобной реализации система видеоконференц-связи будет обладать зависимостью от веб-браузеров и аппаратных возможностей платформы, на которой оно запущено. Кроме того, ВКС как сервис чувствительна к воздействию множества различных факторов и должна соответствовать высоким требованиям обеспечения передачи аудио- и видеопотока приемлемого качества в реальном времени между разнородными пользовательскими устройствами.

Рассмотрим систему ВКС, предложенную в [11] для внедрения сервиса корпоративной ВКС в киберфизическом интеллектуальном пространстве [12]. Рассматриваемая система ВКС предназначена для организации множества параллельных коммуникаций между группами пользователей. При этом каждая отдельная коммуникация поддерживает возможность передачи видеоданных по принципу «многие-ко-многим». Основной видеопоток от каждого пользователя передается по технологии peer-to-peer [13], минуя центральный сервер. В функции центрального сервера входит контроль за созданием коммуникаций (бесед), контроль прав доступа [14], контроль за подключением и отключением пользователей, а также прочие административные функции [15, 16].

Кроме того, центральный сервер осуществляет анализ видеоданных (распознавание лиц в целях верификации пользователей и отслеживание эмоционального состояния пользователей). С этой целью на центральный сервер передается часть видеоданных, необходимая для осуществления аналитики. В рамках настоящей работы центральный сервер рассматривается как некоторый «черный ящик», реализующий описанную выше функциональность. Ключевым требованием к функциям аналитики, реализуемым сервером, является обеспечение real-time аналитики, что предполагает, что результаты анализа будут доступны для пользователя-администратора беседы не позднее чем через некоторый определенный промежуток времени. Для администратора беседы доступно несколько функций:

- локальный контроль вариантов аналитики (глубокая аналитика, идентификация, отсутствие аналитики);
- управление максимально допустимой численностью участников беседы;
- определение режима беседы (трансляция, беседа «многие-ко-многим»).

Каждый из участников беседы может присоединиться к ней как в режиме видеосвязи, так и в режиме аудиосвязи или же вовсе взаимодействовать с другими участниками посредством чата в том случае, если это не противоречит настройкам беседы.

В зависимости от корпоративной культуры и политики руководства при функционировании данной системы в рамках организации могут быть приняты различные положения относительно:

- необходимости аналитики всех видов бесед или отдельных групп бесед;
- необходимости аналитики в отношении отдельных видов пользователей или конкретных пользователей;
- формата участия пользователей в беседах;
- количества допустимого числа участников в тех или иных беседах или типах бесед.

Очевидно, что различные беседы будут в разной степени нагружать центральный сервер системы ВКС. Целью данного исследования является реализация модели, имитирующей функционирование системы ВКС и позволяющей проводить оценку величины нагрузки на центральном сервере системы. Это предоставит возможность определять необходимый объем мощностей для поддержания требуемого режима работы системы.

2. ПОСТРОЕНИЕ ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

В соответствии с представленным описанием исследуемой системы приступим к формализации поставленной задачи. В общем случае нагрузка на центральный сервер может быть определена следующим образом:

$$w = \sum (N_i w_i + N_{new+del} v_i) + T conv_{new}, \quad (1)$$

где N – число участников некоторой беседы; w – ожидаемое условно постоянное значение нагрузки, связанное с поддержанием некоторой активной беседы в расчете на одного пользователя; $N_{new+del}$ – число добавленных и удаленных из некоторой беседы пользователей за некоторый промежуток времени; v – нагрузка, связанная с добавлением (удалением) пользователя в беседу (из беседы); T – сумма числа возникших бесед и числа завершившихся бесед за некоторый период времени; $conv_{new}$ – нагрузка, связанная с созданием (завершением) беседы. Проведем детализацию части указанных выше параметров с учетом возможностей анализа системы. Касательно параметра N , характеризующего число участников некоторой беседы, необходимо выделить подгруппы в общем числе участников в соответствии с формой участия пользователей. Таким образом, выражение для параметра N примет следующий вид:

$$N = N_{video} + N_{audio} + N_{chat},$$

где N_{video} – число участников, подключенных в режиме видеосвязи; N_{audio} – число участников, подключенных в режиме аудиосвязи; N_{chat} – число участников, подключенных в режиме чата. Параметр w также следует уточнить, исходя из различий в возможных форматах участия пользователей в конференции. Данный параметр может принимать одно из следующих значений:

$$w = \{w_{chat}; w_{audio}; w_{video}^{analyt_{coef}}\},$$

где w_{chat} – величина нагрузки от одного пользователя, подключенного в режиме чата; w_{audio} – величина нагрузки от одного пользователя, подключенного в режиме аудиоконференции; $w_{video}^{analyt_{coef}}$ – величина нагрузки от одного пользователя, подключенного в режиме видеоконференции.

Определенный выше добавочный коэффициент $analyt_{coef}$, связанный с проведением аналитики, также может принимать несколько значений в зависимости от заданной глубины аналитики для некоторого пользователя:

$$analyt_{coef} = \{a_{deep}; a_{ident}; a_{none} = 1\},$$

где a_{deep} – повышающий коэффициент для случая глубокой аналитики; a_{ident} – повышающий коэффициент для случая аналитики на уровне идентификации; a_{none} – повышающий коэффициент при отсутствии аналитики.

Параметр $N_{new+del}$, описывающий число добавленных и удаленных из некоторой беседы пользователей за некоторый промежуток времени, может быть детализирован следующим образом:

$$N_{new+del} = N_{new} + N_{del},$$

где N_{new} – число добавленных в беседу пользователей; N_{del} – число отключившихся от беседы пользователей за рассматриваемый период времени.

При рассмотрении параметра v , характеризующего нагрузку, возникающую в связи с добавлением и удалением пользователей, следует отметить, что он может принимать следующие значения:

$$v = \{v_{add}; v_{del}\},$$

где v_{add} – величина нагрузки, возникающая в связи с добавлением пользователя в конференцию, v_{del} – величина нагрузки, возникающая в связи с отключением пользователя от конференции. Отметим, что конкретные значения данных величин могут существенным образом отличаться в зависимости от конфигурации системы ВКС и используемого оборудования. Параметр T также может быть детализирован следующим образом:

$$T = T_{new} + T_{close},$$

где T_{new} – число вновь созданных бесед, а T_{close} – число завершенных бесед за некоторый временной промежуток. Для полноты описания необходимо ввести еще один дополнительный параметр N_{spec} , значение которого соответствует числу специальным образом отслеживаемых пользователей.

Принимая во внимание результаты детализации и спецификации параметров в соответствии с существующими аналитическими возможностями системы ВКС, представим выражение для определения нагрузки на центральный сервер системы от одной конференции:

$$w_i = N_{chat}w_{chat} + N_{audio}w_{audio} + N_{video}w_{video}analyt_{coef} + \\ + N_{spec}analyt_{coef} + N_{new}v_{add} + N_{del}v_{del}.$$

Выражение для определения общей нагрузки на сервер, таким образом, примет следующий вид:

$$w = \sum w_i + T_{new}conv_{new} + T_{close}conv_{new} , \quad (2)$$

Представленное выше выражение (2) легло в основу разработанной имитационной модели. При проведении имитационного моделирования в рамках данной работы были приняты следующие допущения:

1) число подключенных к системе пользователей в общем случае прямо пропорционально числу сотрудников в компании, для которой по условиям эксперимента проводится оценка нагрузки на вычислительные мощности при использовании системы ВКС в некоторой заданной конфигурации;

2) уровень пользовательской активности изменяется в зависимости от времени суток, при этом предполагается, что активность использования системы не меняется в зависимости от дня недели;

3) предполагается, что центральный сервер способен эффективно обслуживать систему ВКС в соответствующей конфигурации до тех пор, пока а) текущий уровень нагрузки не достигнет предельного значения для имеющихся вычислительных мощностей или б) уровень нагрузки не будет превышать 95 % от предельного значения на протяжении более 5 % от суточного времени активности системы.

Используем вышеописанную имитационную модель, чтобы оценить ожидаемый уровень нагрузки на центральный сервер системы при функционировании системы ВКС в заданном режиме, а также установить, являются ли предоставленные мощности достаточными для функционирования системы ВКС в требуемом режиме.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для реализации разработанной модели и проведения экспериментов использовалась программная среда Matlab, которая, помимо достоинств, связанных с крайне производительными матричными вычислениями и оптимизированной линейной алгеброй, является достаточно гибкой для решения всех поставленных в рамках работы задач. Применим разработанную модель для ряда сценариев, описывающих использование системы ВКС в различных конфигурациях. Рассмотренные сценарии сформированы на основе выбора целевых значений по приведенным ниже критериям (для каждого критерия может быть выбрано лишь одно значение), имитирующим корпоративную среду и политику руководства в отношении использования системы ВКС. Соответствующий список критериев представлен ниже.

1. Число сотрудников (до 1000; до 10 000; до 100 000).
2. Преимущественные форматы коммуникаций в компании:
 - а) преимущественно совещательные группы;
 - б) преимущественно дистанционные выступления;
 - в) смешанный формат.

3. Уровень аналитики по умолчанию (аналитика отсутствует, идентификация пользователей, глубокая аналитика) – применяется ко всем видам бесед и всем группам пользователей.

4. Ограничения по формату участия по умолчанию (любой формат участия, аудиоподключение или же видеосвязь, видеосвязь) – применяется ко всем видам бесед и всем группам пользователей.

5. В рамках сценариев доступны два вида бесед:

- а) совещание;
- б) выступление.

Для каждого вида бесед необходимо выбрать уровень аналитики по умолчанию (аналитика отсутствует, идентификация пользователей, глубокая аналитика).

6. Для каждого вида бесед необходимо указать ограничение по максимально допустимому числу участников.

7. В рамках сценариев доступны три группы пользователей:

- а) менеджмент;
- б) технические специалисты;
- в) бухгалтерия и финансовый отдел.

Для каждой группы пользователей необходимо выбрать долю данной группы в общем числе сотрудников (сумма по трем группам должна составлять 100 %).

8. Для каждой группы пользователей необходимо выбрать уровень аналитики по умолчанию (аналитика отсутствует, идентификация пользователей, глубокая аналитика).

9. Также необходимо выбрать число специальным образом отслеживаемых пользователей и формат аналитики по ним (идентификация пользователей; глубокая аналитика).

Важно отметить тот факт, что администратор каждой беседы имеет право в рамках курируемой беседы изменять допустимые варианты подключения пользователей и варианты аналитики. Данные изменения не должны противоречить выбранным значениям по критериям 3, 4, 6 и 10, в противном случае они будут отвергнуты системой. Приведем сценарии, разработанные для моделирования нагрузки на сервер системы ВКС и результаты моделирования.

Сценарий № 1. Рассматривается использование системы ВКС организацией среднего размера без жестких требований к безопасности или аналитике переговоров и совещаний.

С использованием разработанной имитационной модели были получены ожидаемые значения нагрузки на центральный сервер системы ВКС за 13-часовой период, соответствующий продолжительности стандартного внутрисуточного цикла активного использования информационных систем в компании. Полученные результаты представлены на рис. 1.

Таблица 1

Table 1

Выбранные значения критериев в рамках сценария № 1
Selected Criteria Values in Scenario 1

Критерий	Значение критерия
Число сотрудников	До 1000
Преимущественные форматы коммуникаций в компании	Преимущественно совещательные группы
Уровень аналитики по умолчанию	Аналитика отсутствует
Ограничения по формату участия по умолчанию	Аудиоподключение или видеосвязь
Уровень аналитики по умолчанию по видам бесед	
Совещание Выступление	Идентификация пользователей Аналитика отсутствует
Ограничение по максимально допустимому числу участников по видам бесед	
Совещание Выступление	20 человек 50 человек
Доля отдельных групп пользователей в общем числе сотрудников	
Менеджмент Технические специалисты Бухгалтерия и финансовый отдел	12 % 66 % 22 %
Уровень аналитики по умолчанию по группам пользователей	
Менеджмент Технические специалисты Бухгалтерия и финансовый отдел	Идентификация пользователей Аналитика отсутствует Глубокая аналитика
Число специальным образом отслеживаемых пользователей	27
Уровень аналитики по специальным образом отслеживаемым пользователям	Глубокая аналитика
Доступные вычислительные мощности	10 гигафлопс



а



б



в

Рис. 1. Результаты моделирования сценария № 1:

а – средняя величина нагрузки на центральный сервер; б – относительное значение средней величины нагрузки на центральный сервер в сравнении с максимально допустимыми значениями; в – максимальные и минимальные значения нагрузки на центральный сервер для каждого момента времени на исследуемом временном промежутке

Fig. 1. The results of simulation scenario 1:

а – An average load on the central server; б – A relative value of the average load on the central server in comparison with the maximum allowable values; в – Maximum and minimum values of the load on the central server for each time period

В рамках данного эксперимента было проведено 100 имитаций, и для каждой из них были сформированы оценки величины нагрузки на доступные вычислительные мощности. Полученные результаты демонстрируют, что требуемая конфигурация системы ВКС может быть размещена на имеющемся у компании оборудовании и что данная система будет успешно функционировать в штатном режиме даже во время наибольшей активности пользователей. При пиковой активности в системе значение нагрузки не превышает 6 гигафлопс, или 0.6 в относительных единицах.

Сценарий № 2. Рассмотрению подвергается достаточно крупная организация с высокими требованиями к безопасности, заинтересованная в аналитике переговоров и совещаний.

Таблица 2

Table 2

Выбранные значения критериев в рамках сценария № 2

Selected Criteria Values in Scenario 2

Критерий	Значение критерия
Число сотрудников	До 10 000
Преимущественные форматы коммуникаций в компании	Преимущественно совещательные группы
Уровень аналитики по умолчанию	Идентификация пользователей
Ограничения по формату участия по умолчанию	Видеосвязь
Уровень аналитики по умолчанию по видам бесед	
Совещание	Глубокая аналитика
Выступление	Идентификация пользователей
Ограничение по максимально допустимому числу участников по видам бесед	
Совещание	15 человек
Выступление	35 человек
Доля отдельных групп пользователей в общем числе сотрудников	
Менеджмент	15 %
Технические специалисты	55 %
Бухгалтерия и финансовый отдел	30 %
Уровень аналитики по умолчанию по группам пользователей	
Менеджмент	Глубокая аналитика
Технические специалисты	Идентификация пользователей
Бухгалтерия и финансовый отдел	Глубокая аналитика
Число специальным образом отслеживаемых пользователей	1400
Уровень аналитики по специальным образом отслеживаемым пользователям	Глубокая аналитика
Доступные вычислительные мощности	85 гигафлопс

По аналогии со сценарием № 1 были получены ожидаемые значения нагрузки на центральный сервер системы ВКС за 13-часовой период, соответствующий продолжительности стандартного внутрисуточного цикла активного использования информационных систем в компании. Полученные результаты представлены на рис. 2.



а



б



в

Рис. 2. Результаты моделирования сценария № 2:

а – средняя величина нагрузки на центральный сервер; б – относительное значение средней величины нагрузки на центральный сервер в сравнении с максимально допустимыми значениями; в – величина нагрузки в течение дня, характеризуемого максимальным пиковым значением нагрузки на вычислительные мощности

Fig. 2. The simulation results of scenario 2:

а – An average load on the central server; б – A relative value of the average load on the central server in comparison with the maximum permissible values; в – The load value during the day characterized by the maximum peak load on the computing power

По аналогии с предыдущим случаем, в данном эксперименте также было проведено 100 имитаций, и для каждой из них была выполнена оценка величины нагрузки на доступные вычислительные мощности. В соответствии с результатами имитационного моделирования, представленными на рис. 2, было выявлено, что вероятность отказа системы в течение рабочего дня равна единице. Таким образом, можно сделать вывод, что требуемая конфигурация системы ВКС не может быть размещена на имеющемся у компании оборудовании. Во время повышенной активности пользователей используемое оборудование не сможет справиться с нагрузкой, вследствие чего функционирование системы будет нарушено.

Сценарий № 3. Рассматривается крупная международная организация, ориентированная на взаимодействие с большим числом пользователей и заинтересованная в сборе аналитики преимущественно о потребителях.

Таблица 3

Table 3

Выбранные значения критериев в рамках сценария № 3

Selected Criteria Values in Scenario 3

Критерий	Значение критерия
Число сотрудников	До 100000
Преимущественные форматы коммуникаций в компании	Преимущественно дистанционные выступления
Уровень аналитики по умолчанию	Идентификация пользователей
Ограничения по формату участия по умолчанию	Аудио подключение или же видеосвязь
Уровень аналитики по умолчанию по видам бесед	
Совещание	Аналитика отсутствует
Выступление	Идентификация пользователей
Ограничение по максимально допустимому числу участников по видам бесед	
Совещание	15 человек
Выступление	150 человек
Доля отдельных групп пользователей в общем числе сотрудников	
Менеджмент	6 %
Посетители	85 %
Технические специалисты	9 %
Уровень аналитики по умолчанию по группам пользователей	
Менеджмент	Идентификация пользователей
Посетители	Глубокая аналитика
Технические специалисты	Идентификация пользователей
Число специальным образом отслеживаемых пользователей	900
Уровень аналитики по специальным образом отслеживаемым пользователям	Глубокая аналитика
Доступные вычислительные мощности	200 гигафлопс

Были определены ожидаемые значения нагрузки на центральный сервер системы ВКС за 13-часовой период, соответствующий продолжительности стандартного внутрисуточного цикла активного использования информационных систем в компании. Полученные результаты представлены на рис. 3.



Рис. 3. Результаты моделирования сценария № 3:

a – средняя величина нагрузки на центральный сервер; *б* – относительное значение средней величины нагрузки на центральный сервер в сравнении с максимально допустимыми значениями; *в* – величина нагрузки в течение дня, характеризуемого максимальным пиковым значением нагрузки на вычислительные мощности

Fig. 3. The results of the simulation scenario 3:

a – An average load on the central server; *b* – A relative value of the average load on the central server in comparison with the maximum allowable values; *c* – The load value during the day characterized by the maximum peak load on the computing power

По аналогии с предыдущим случаем, в данном эксперименте было проведено 100 имитаций, и для каждой из них была выполнена оценка величины нагрузки на доступные вычислительные мощности. Результаты, представленные на графиках выше, демонстрируют, что требуемую конфигурацию системы ВКС не следует размещать на имеющемся у компании оборудовании, поскольку во время наибольшей активности пользователей система с достаточно высокой вероятностью (41 %) будет выходить из строя, несмотря на то что в остальное время система будет успешно функционировать в штатном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель, имитирующая нагрузку на центральный сервер системы ВКС, способна учесть достаточно широкое число параметров, что было продемонстрировано на примере трех сценариев, учитывающих различную конфигурацию системы и требования, предъявляемые к ней с точки зрения количества пользователей, формата коммуникации, а также анализа видеопотоков. Данная модель не только имитирует функционирование системы ВКС при различных пользовательских настройках, но и позволяет устанавливать системные параметры, а потому вполне пригодна для полноценного применения на практике.

Разработанная модель предусматривает возможность дальнейшего расширения списка параметров. В частности, можно учесть большее число потенциально возможных действий пользователей, например, нагрузку, связанную с отправкой файлов и прочих данных между пользователями в рамках отдельной беседы, а также посредством расширения используемых шкал для различных показателей. Также может быть расширен список полномочий администраторов бесед, что позволит учитывать локальные корректировки настроек системы ВКС на уровне бесед, в частности, учитывать возможности временной блокировки отдельных возможностей у отдельно взятых пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dalal S., Chhillar R.S. Case studies of most common and severe types of software system failure // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – 2012. – Vol. 2, N 8. – P. 341–347.
2. Weyuker E.J., Vokolos F.I. Experience with performance testing of software systems: issues, an approach, and case study // IEEE Transactions on Software Engineering. – 2000. – Vol. 26, N 12. – P. 1147–1156.
3. Firefox download stunt sets record for quickest meltdown [Electronic resource]. – URL: <http://www.siliconbeat.com/2008/06/17/firefox-download-stunt-sets-record-for-quickest-meltdown/> (accessed: 26.03.2019).
4. Cheng J. Steve Jobs on MobileMe [Electronic resource]. – URL: <http://arstechnica.com/journals/apple.ars/2008/08/05/steve-jobs-on-mobileme-the-full-e-mail> (accessed: 26.03.2019).
5. Jiang Z.M., Hassan A.E. A survey on load testing of large-scale software systems // IEEE Transactions on Software Engineering. – 2015. – Vol. 41, N 11. – P. 1091–1118.
6. Ho C.-W., Williams L., Anton A.I. Improving performance requirements specification from field failure reports // Proceedings of the 15th IEEE International Requirements Engineering Conference RE'07. – New Delhi, India, 2007. – P. 79–88.
7. Ho C.-W., Williams L., Robinson B. Examining the relationships between performance requirements and “not a problem” defect reports // Proceedings of the 16th IEEE International Requirements Engineering Conference RE'08. – Barcelona, Spain, 2008. – P. 135–144.
8. Avritzer A., Bondi A.B. Resilience assessment based on performance testing // Resilience Assessment and Evaluation of Computing Systems. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. – P. 305–322.
9. Карнов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009.
10. Praehofer H. System theoretic formalisms for combined discrete-continuous system simulation // International Journal of General System. – 1991. – Vol. 19, N 3. – P. 226–240.
11. Архитектурные решения интеграции модуля видеоконференц-связи в киберфизическое интеллектуальное пространство / Е.Ю. Карасёв, И.В. Ватаманюк, А.И. Савельев, А.Л. Ронжин // Информационно-управляющие системы. – 2018. – № 1. – С. 2–10.

12. Левоневский Д.К., Ватаманюк И.В., Савельев А.И. Многомодальная информационно-навигационная облачная система МИНОС для корпоративного киберфизического интеллектуального пространства // Программная инженерия. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 120–128.

13. *Androutsellis-Theotokis S., Spinellis D.* A survey of peer-to-peer content distribution technologies // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2004. – Vol. 36, N 4. – P. 335–371.

14. Representing and reasoning about web access control policies / G.J. Ahn, H. Hu, J. Lee, Y. Meng // 2010 IEEE 34th Annual Computer Software and Applications Conference. – Seoul, Korea, 2010. – P. 137–146.

15. Левоневский Д.К. Формализация сценариев функционирования интеллектуального пространства с помощью темпоральной логики действий // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы III межрегиональной научно-практической конференции. – Севастополь, 2017. – С. 86–88.

16. *Levonevskiy D., Vatamaniuk I., Saveliev A.* Integration of corporate electronic services into a smart space using temporal logic of actions // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10459. – P. 134–143.

Яковлев Роман Никитич, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Основное направление научных исследований: киберфизические системы, средства интеллектуального анализа и обработки данных. Имеет более 7 публикаций. E-mail: iakovlev.r@mail.ru

Yakovlev Roman Nikitich, a junior research officer at the laboratory of Autonomous Robotic Systems in the St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. His research interests are focused on cyber-physical systems and data mining and processing tools. He is the author of 7 publications. E-mail: iakovlev.r@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-125-140

A simulation model for estimating the computational load on the central server of a videoconferencing system*

R.N. YAKOVLEV

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

iakovlev.r@mail.ru

Abstract

Nowadays many problems arise in various fields such as organization of production, supply or maintenance, transportation, staff planning, planning the supply of resources and equipment, and the use of simulation models to solve them has become widespread.

In this study, a model that simulates functioning of a videoconferencing system and allows assessing the load on the central server of this system was developed. The paper describes a videoconferencing system designed to organize parallel communications between different groups of users as well as its capabilities. The developed simulation model takes into account various system configuration parameters and requirements such as the number of users served, the format of communications, and the analysis of video streams. The model allows calculating the computing power required for the stable system work when implementing various operating scenarios based on the results of the load assessment on the central server of video conferencing system. The scenarios studied include the use of a videoconferencing system, both within a small company that did not impose high requirements on the analysis of the negotiation process, and within a large transnational company that imposes high requirements on the analytics of consumers connected to the videoconferencing system. The proposed solution meets the criteria for scalability and provides a possibility to take into account a greater number of possible actions made by users and by administrators of videoconferencing systems.

Keywords: Information systems, teleconferencing, videoconferencing, simulation modeling, system testing, client-server architecture, load testing, quality of service, QoS

* Received 12 October 2018.

REFERENCES

1. Dalal S., Chhillar R.S. Case studies of most common and severe types of software system failure. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2012, vol. 2, no. 8, pp. 341–347.
2. Weyuker E.J., Vokolos F.I. Experience with performance testing of software systems: issues, an approach, and case study. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2000, vol. 26, no. 12, pp. 1147–1156.
3. *Firefox download stunt sets record for quickest meltdown*. Available at <http://www.siliconbeat.com/2008/06/17/firefox-download-stunt-sets-record-for-quickest-meltdown/> (accessed 26.03.2019).
4. Cheng J. *Steve Jobs on MobileMe*. Available at: <http://arstechnica.com/journals/apple.ars/2008/08/05/steve-jobs-on-mobileme-the-full-e-mail> (accessed 26.03.2019).
5. Jiang Z.M., Hassan A.E. A survey on load testing of large-scale software systems. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2015, vol. 41, no. 11, pp. 1091–1118.
6. Ho C.-W., Williams L., Anton A.I. Improving performance requirements specification from field failure reports. *Proceedings of the 15th International Requirements Engineering Conference RE'07*, New Delhi, India, 2007, pp. 79–88.
7. Ho C.-W., Williams L., Robinson B. Examining the relationships between performance requirements and “not a problem” defect reports. *Proceedings of the 16th IEEE International Requirements Engineering Conference RE'08*, Barcelona, Spain, 2008, pp. 135–144.
8. Avritzer A., Bondi A.B. Resilience assessment based on performance testing. *Resilience Assessment and Evaluation of Computing Systems*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2012, pp. 305–322.
9. Karpov Yu.G. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem* [Simulation modeling systems]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2009.
10. Praehofer H. System theoretic formalisms for combined discrete-continuous system simulation. *International Journal of General System*, 1991, vol. 19, no. 3, pp. 226–240.
11. Karasev E.Yu., Vatamaniuk I.V., Saveliev A.I., Ronzhin A.L. Arkhitekturnye resheniya integratsii modulya video-konferents-svyazi v kiberfizicheskoe intellektual'noe prostranstvo [Architectural solutions for integrating a video conferencing module into cyberphysical intelligent space]. *Informatsionno-upravlyayushchiesistemy. Informatsionno-upravlyayushchie sistemy – Information and Control Systems*, 2018, no. 1, pp. 2–10.
12. Levonevskiy D.K., Vatamaniuk I.V., Saveliev A.I. Mnogomodal'naya informatsionno-navigatsionnaya oblachnaya sistema MINOS dlya korporativnogo kiberfizicheskogo intellektual'nogo prostranstva [MINOS multimodal information and navigation cloud system for the corporate cyber-physical smart space]. *Programmnyaya inzheneriya – Software Engineering*, 2017, no. 3, pp. 120–128.
13. Androutsellis-Theotokis S., Spinellis D. A survey of peer-to-peer content distribution technologies. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2004, vol. 36, no. 4, pp. 335–371.
14. Ahn G.J., Hu H., Lee J., Meng Y. Representing and reasoning about web access control policies. *2010 IEEE 34th Annual Computer Software and Applications Conference*, Seoul, Korea, 2010, pp. 137–146.
15. Levonevskiy D.K. [Formalization of scenarios for the functioning of the intellectual space using temporal logic of actions]. *Perspektivnye napravleniya razvitiya otechestvennykh informatsionnykh tekhnologii: materialy III mezhhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Advanced national information systems and technologies. Materials of the III Interregional Scientific and Practical Conference], Sevastopol, 2017, pp. 86–88. (In Russian).
16. Levonevskiy D., Vatamaniuk I., Saveliev A. Integration of corporate electronic services into a smart space using temporal logic of actions. *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 10459, pp. 134–143.

Для цитирования:

Яковлев Р.Н. Имитационная модель оценивания вычислительной нагрузки на центральный сервер системы видеоконференц-связи // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 125–140. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-125-140.

For citation:

Iakovlev R.N. Imitatsionnaya model' otsenivaniya vychislitel'noi nagruzki na tsentral'nyi server sistemy videokonferents-svyazi [Simulation model for estimating the computational load on central server of the videoconferencing system] *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 125–140. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-125-140.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,
METROLOGY,
AND INFORMATION-
MEASUREMENT
SYSTEMS

УДК 004: 1082

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-141-156

Анализ результатов тестирования медицинской экспертной системы на основе интеграции традиционной западной и восточной медицины*

Ю. АЮУШ

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

a_yum@mail.ru

Выявление заболеваний на ранней стадии даст возможность предотвращать болезни и проводить их эффективное лечение. Достоверная идентификация лечения зависит от метода, используемого в диагностировании болезней. Однако установление диагноза на ранней стадии болезни является сложной проблемой в случае большинства заболеваний с похожими симптомами и признаками. Предлагается использовать экспертную систему на основе интеграции традиционной западной и восточной медицины, позволяющую учесть как причины болезни, так и образ жизни человека. Дифференцированная оценка взаимосвязей болезней у человека даст возможность выделить конституционально-зависимые признаки болезни и факторы риска, позволит индивидуализировать прогноз и лечение, что, в свою очередь, улучшит результаты терапии заболевания. Медицинская диагностическая экспертная система на основе интеграции традиционной западной и восточной медицины представляет для изучения дополнительные факторы болезни, в частности, влияние антропологических и психологических данных человека на проявление болезни. Для решения поставленных задач использовались аппарат теории вероятностей, математической статистики и искусственного интеллекта. В предлагаемой модели выбор показателей информативности диагностических методов может производиться как по вектору допускаемых врачом диагнозов, так и по отдельным заболеваниям. Для создания базы знаний необходима интеграция различных источников. С этой целью формируются различные морфизмы, отражающие предпочтительные диагностические связи между ключевыми конституционными типами организма человека и множеством диагнозов заболеваний. В работе существенно расширены возможности модели и основных функций разрабатываемой экспертной системы, которые заключаются в выдаче врачу списка достоверной с точки зрения экспертной системы гипотезы дифференциального диагноза на основании введенных симптомов и предполагаемых, имеющихся или исключенных сопутствующих диагнозов. В статье описываются результаты прохождения

* *Статья получена 14 ноября 2018.*

тестирования медицинской диагностической системы и результаты статистической обработки полученных данных.

Ключевые слова: система принятия решений, диагностика, западная и восточная медицина, оценка состояния здоровья, априорная и апостериорная вероятность, энтропия информации, проверка статистических гипотез, достоверность диагностики

ВВЕДЕНИЕ

С начала 1970-х годов в традиционной западной медицинской практике началось использование экспертных систем, работающих с большими объемами знаний, для усовершенствования качества диагностики. Важным аспектом экспертной системы является поддержка принятия сложных решений на основе накапливаемой базы знаний, отражающей опыт работы экспертов в данной области [1, 2].

Основная задача диагностической системы принятия решений состоит в установлении клинического диагноза пациенту (т. е. лицу с определенными жалобами). Для создания базы знаний необходима интеграция различных источников. Для этого разрабатывается специальный диагностический тест, на начальном этапе прохождения которого вводится информация о симптомах, наблюдаемых у пациента. Это означает использование информационных технологий для медицины и процесса мультидиагностирования. Существуют различные подходы для разработки диагностических тестов, в данном случае будут рассматриваться подходы с использованием методов теории вероятностей и восточной медицины. Главной особенностью модели является попытка определить влияние конституционного фактора человека на причину проявления болезни. С этой целью формируются различные морфизмы, отражающие предпочтительные диагностические связи между ключевыми конституциональными типами организма человека и множеством традиционных западных диагнозов.

В предлагаемой модели выбор показателей информативности диагностических методов может производиться как по вектору допускаемых врачом диагнозов, в целом, так и по отдельным заболеваниям.

1. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ОЦЕНКИ ДИАГНОСТИЧНОСТИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

Стремительная эволюция математических методов, основанных на вычислительных алгоритмах, позволила реализовать диагностические методы в виде сложных процедур. Кроме того, для оценки диагностической точности и эпидемиологической эффективности автоматизированных методов доступны проекты исследований, статистические методы анализа данных и методические рекомендации.

Бинарный тест позволит оценивать правдоподобие для обоих результатов. При анализе любого тестирования определяется интерпретация диагноза (положительный или отрицательный) у больных с наличием или отсутствием заболевания (табл. 1) [3].

Таблица 1

Table 1

Интерпретация наличия заболевания («положительный» и «отрицательный»)**The interpretation of disease presence ('positive' and 'negative')**

Тест	Заболевание		Итого пациентов
	присутствует	отсутствует	
Положительный	a	b	$a + b$
Отрицательный	c	d	$c + d$
Итого	$a + c$	$b + d$	$a + b + c + d$

Для характеристики информативности диагностических методов исследования служат объективные параметры, именуемые операционными характеристиками исследования (теста).

К важнейшим операционным характеристикам метода диагностики относятся:

- чувствительность диагностического теста (Se , sensitivity) – доля позитивных результатов теста в группе больных пациентов:

$$Se = a/(a + c), \quad (1)$$

где $(a + c)$ – количество больных пациентов по результатам теста, a – количество больных из $(a + c)$;

- специфичность диагностического теста (Sp , specificity) – доля негативных результатов теста в группе здоровых пациентов:

$$Sp = d/(b + d), \quad (2)$$

где $(b + d)$ – количество здоровых пациентов, d – количество здоровых из $(b + d)$.

Понятно, что более информативные данные, определяющие симптомы, окажут больше влияние на диагноз, в отличие от неполных данных (например, жалобы пациента о болезни, случайные ошибки в лабораторных исследованиях, неправильное истолкование результатов исследования и т. п.) [4–5].

Основная сложность при проектировании медицинской экспертной системы заключается в определении соответствия и точности результатов из диагностик традиционной западной и восточной медицины.

Предлагаемая математическая формализация направлена на выявление логических основ диагностики о болезнях, описываемых различными понятиями и моделями. Для повышения точности диагноза разработаны программный модуль критерия диагностичности (информативности) и модуль анализа на основе условных энтропий. Условные вероятности определяют

правдоподобие получения у пациента ответа на вопрос о наличии (отсутствии) жалоб при условии наличия (отсутствия) диагноза для определения симптомов, которые информативны при подсчете вероятности диагноза по формуле Байеса. Оценка априорных вероятностей происходит на основе статистической вероятности диагноза.

Значения правдоподобия симптоматической информации принимаются для расчета апостериорных вероятностей диагнозов. Апостериорные вероятности для всех пар «диагноз–симптом» при любом ответе на вопрос оцениваются по правилу Байеса [6–8].

Имеются множества диагнозов D и симптомов S , на основе которых специалист может получить необходимую информацию о диагностике заболеваний. Каждый диагноз $P(D_i)$, $i = \overline{1, n}$, со своим отрицанием $P(\overline{D}_i) = 1 - P(D_i)$ составляет ансамбль гипотез на множестве симптомов $\{S_j\}$, $j = \overline{1, m}$. Обозначим через S_j наличие симптома, а через \overline{S}_j – то, что он отсутствует.

На рис. 1 показана связь между симптомами и болезнью. Это означает, что «если все симптомы от S_1 до S_n являются истинными, то болезнь D_1 также истинна» или «когда все симптомы от S_1 до S_n появляются, то следует диагностировать болезнь D_1 ».

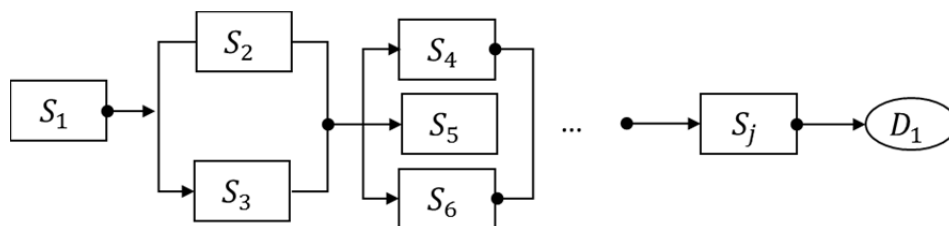


Рис. 1. Последовательность проверки симптомов данной болезни

Fig. 1. Sequence of verification of the given disease symptoms

Определим условные вероятности, отражающие правдоподобие получения у пациента ответа на вопрос о наличии (отсутствии) симптома при условии наличия (отсутствия) диагноза. Определяется только для тех симптомов, которые информативны при подсчете вероятности диагноза по формуле Байеса.

Обозначения вероятностей представлены в работе [9]:

$$\{P(S_j/D_i)\}; \{P(\overline{S}_j/D_i)\}; \{P(S_j/\overline{D}_i)\}; \{P(\overline{S}_j/\overline{D}_i)\}.$$

Здесь вероятности диагноза $P_{apost}(D_i)$ и $P_{apost}(\overline{D}_i)$ определяются при наличии или отсутствии симптома, выявляемого при ответах пациента:

$$P_{apost} \left(\frac{D_i}{S_j} \right) = \frac{P(D_i) P(S_j/D_i)}{P(S_j)}, \quad (3)$$

где

$$P(S_j) = P(D_i) P\left(\frac{S_j}{D_i}\right) + P(\overline{D_i}) P\left(\frac{S_j}{\overline{D_i}}\right);$$

$$P_{apost}\left(\frac{D_i}{S_j}\right) = \frac{P(D_i) P\left(\frac{S_j}{D_i}\right)}{P(S_j)}, \quad (4)$$

где

$$P_{apost}(\overline{S_j}) = P(D_i) P\left(\frac{\overline{S_j}}{D_i}\right) + P(\overline{D_i}) P\left(\frac{\overline{S_j}}{\overline{D_i}}\right).$$

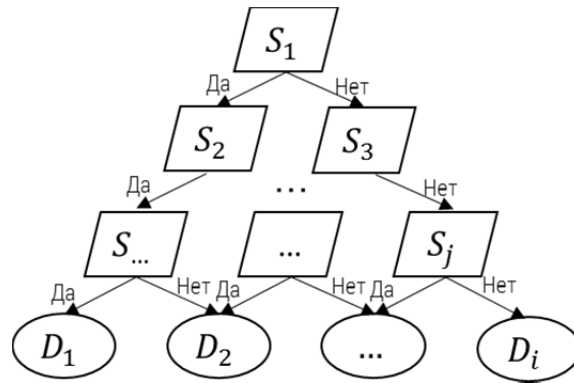


Рис. 2. Выбор между симптомами

Fig. 2. Selection between symptoms

Противоположные случаи апостериорных вероятностей:

$$P_{apost}\left(\frac{\overline{D_i}}{S_j}\right) = 1 - P_{apost}\left(\frac{D_i}{S_j}\right); \quad (5)$$

$$P_{apost}\left(\frac{\overline{D_i}}{\overline{S_j}}\right) = 1 - P_{apost}\left(\frac{D_i}{\overline{S_j}}\right). \quad (6)$$

Если использовать шенноновское количество информации, заключенное в ответе, в качестве критерия диагностичности симптома при первом вопросе, то имеем две частные условные энтропии (остаточные) [10]:

$$H\left(\frac{D_i}{S_j}\right) = - \left[P_{apost}\left(\frac{D_i}{S_j}\right) \log P_{apost}\left(\frac{D_i}{S_j}\right) + P_{apost}\left(\frac{\overline{D_i}}{S_j}\right) \log P_{apost}\left(\frac{\overline{D_i}}{S_j}\right) \right]. \quad (7)$$

Аналогично для

$$H\left(\frac{D_i}{\bar{S}_j}\right) = -\left[P_{apost}\left(\frac{D_i}{\bar{S}_j}\right) \log P_{apost}\left(\frac{D_i}{\bar{S}_j}\right) + P_{apost}\left(\frac{\bar{D}_i}{\bar{S}_j}\right) \log P_{apost}\left(\frac{\bar{D}_i}{\bar{S}_j}\right) \right]. \quad (8)$$

Тогда средняя условная энтропия

$$\bar{H}\left(\frac{D_i}{S_j}\right) = P(S_j) H\left(\frac{D_i}{S_j}\right) + P(\bar{S}_j) H\left(\frac{D_i}{\bar{S}_j}\right). \quad (9)$$

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТИТУЦИОННЫХ ТИПОВ ЧЕЛОВЕКА

В настоящее время исследователи в области медицины конституцию рассматривают в качестве основной характеристики состояния здоровья целостного организма человека. В качестве исходных данных диагностики при восточной диагностике используется опросник, включающий определенные вопросы, сформулированные специально для определения конституциональных типов человека, и список вероятных болезней. Учение о конституциях является основной теорией познания человека, что основано на представлении о соматопсихической ценности человеческого организма. Антропологические особенности индивидуума необходимо учитывать не только в качестве предиктора возникновения заболевания, но и как фактора, определяющего особенности клиники и течения многофакториальных болезней. С точки зрения восточной медицины совокупность антропологических и психологических данных человека дает эффективную информацию о состоянии человеческого здоровья и о понятии его образа жизни и имеет очень распространенное применение в диагностическом и лечебном процессах.

В Стратегии Всемирной организации здравоохранения с 2002 по 2005 год определяется, что «восточная или народная медицина расширяет масштабы тенденции использования в медицинской помощи и альтернативной медицины в качестве источника ресурсов. В этой связи нам необходимо усовершенствовать конкретную политику и методологию для интеграции традиционной западной и восточной медицины и решить проблему обеспечения доступности, безопасности и эффективности диагноза и лечения» [11]. Таким образом, научное исследование определения человеческой врожденной особенности (конституционный тип человека) по его морфологическим и психодинамическим характеристикам является ценными дополнительными данными для лечебного и диагностического процессов традиционной западной медицины [12].

Во многих древнейших канонах восточной медицины написано, что состояние здоровья человеческого организма зависит от равновесия трех основных регулирующих систем (также называются основными элементами): ветер (нервная система), желчь (пищеварительная система) и слизь (эндокринная и лимфатическая система). Конституционные типы человека являются основными диагностическими факторами восточной медицины и опре-

деляются на основе этих трех основных систем. В зависимости от выраженности и соотношения тех или иных признаков и свойств морфологии, физиологических систем и организма целом, в том числе особенностей нервной системы, присущих исследуемому населению, принято выделять следующие конституционные типы: доминирующие типы T1–T3 (ветер, желчь и слизь), смешанные типы T4–T6 (ветер–желчь, желчь–слизь и ветер–слизь; аналогично можно определить желчь–ветер, слизь–желчь и слизь–ветер) и комбинированный тип T7 (ветер–желчь–слизь) [13].

Следовательно, правильное определение типа конституции человека в случае заболевания или до его проявления даст возможность выделить основные признаки болезни или состояние его здоровья, также позволит прогнозировать терапию или профилактику разных болезней, что, в свою очередь, улучшит результаты лечения заболевания [14, 15].

Предполагается, что после предварительного клинического обследования пациента и проведения типовых диагностических процедур врач формирует множество возможных диагнозов. В общих случаях при предварительной диагностике человек дает устное описание проявляющихся симптомов текущей болезни. Вследствие этого при определении реально присутствующего заболевания (заболеваний) встает актуальная задача выбора в качестве эталона других методов диагностики, которые по своему характеру дают максимально возможную и точную характеристику патологического процесса.

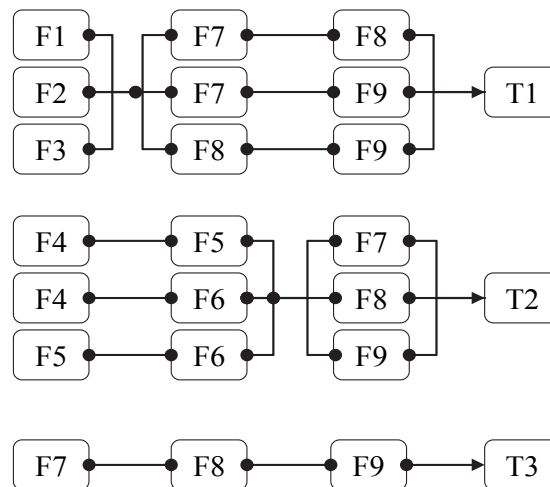


Рис. 3. Ситуативная модель отношений между конституционными типами и их основными факторами

Fig. 3. Situational model of the relations between constitution types and main facts

Предположим, что в нашем случае получим следующую информацию, например:

1) человек выбирает фактор $F1$ и одновременно $F8$ или $F9$, тогда должен обнаруживаться тип $T1$:

$$F1[F8 + F9] \rightarrow T1;$$

2) человек выбирает фактор $F2$ и одновременно $F7$ или $F9$ при отсутствии $F1$ и $F3$, тогда должен обнаружиться тип $T2$:

$$F2[F7 + F9] \overline{F1} \overline{F3} \rightarrow T2;$$

3) у человека обнаруживается три равных фактора. Это означает, что тип конституции $T3$:

$$[F7 \cdot F8 \cdot F9] \rightarrow T3.$$

Под конституционно-морфологическими характеристиками подразумевают такие показатели структуры, метаболизма, функции, психики и поведения человека, которые на протяжении значительного времени существенно не изменяются. Благодаря определению конституционных типов человека можно получить информацию о причине болезни в соответствии с внутренними факторами, структурой телосложения и его особенностями [16].

На первый взгляд можно ограничиться использованием данных симптомов болезней, но при более подробном изучении можно сделать вывод, что использование данных о симптомах болезни не дает полного результата из-за того, что некоторые симптомы, проявляющиеся в разных заболеваниях, могут не проявиться на начальном этапе болезни.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В предлагаемой системе диагностики проводится два теста: первый тест – на основе западной медицины, второй включает дополнительные вопросы с учетом конституции человека (по восточной медицине). Система формирует диагноз на основе ответов пользователя по конкретным вопросам, задаваемым пользователю. Ответы на вопросы обеспечивают систему информацией для объяснения симптомов болезни пациента, помогающего экспертной системе выдать диагноз болезни посредством механизма логического вывода.

При проверке тестирования в системе использовались полученные данные по опросам 235 человек. Из них 102 были здоровыми, и остальные 133 – с различными диагнозами. Все эти диагнозы были разделены на две группы болезней (сердечно-сосудистые заболевания и заболевания почек).

Таблица 2

Table 2

Частоты встречаемости конституционных типов участников

Frequencies of constitution types

№ п/п	Тип конституции	Частота М	Частота Ж	Частота М	Частота Ж
		Здоровые		Больные	
1	Тип 1	1	1	5	8
2	Тип 2	1	19	18	28

Окончание табл. 2

End tab. 2

№ п/п	Тип конституции	Частота М	Частота Ж	Частота М	Частота Ж
		Здоровые		Больные	
3	Тип 3	0	1	0	4
4	Тип 4	17	31	7	33
5	Тип 5	2	2	3	4
6	Тип 6	9	12	16	7
7	Тип 7	1	5	0	0
Итого		31	71	49	84
		102		133	

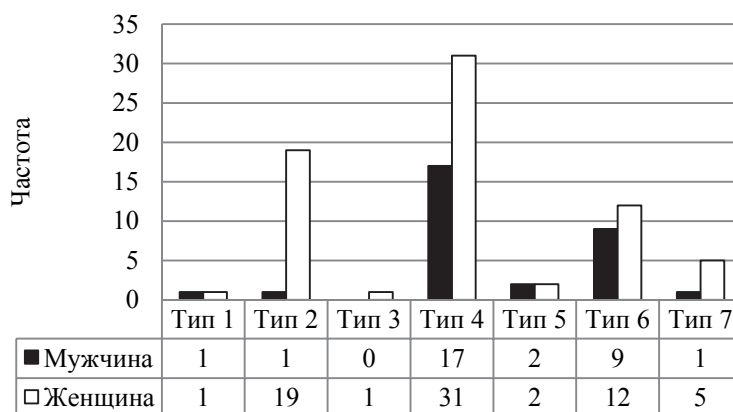


Рис. 4. Диаграмма частоты встречаемости конституционных типов в группе здоровых

Fig. 4. Chart of encounter rates frequency of constitution types in health group

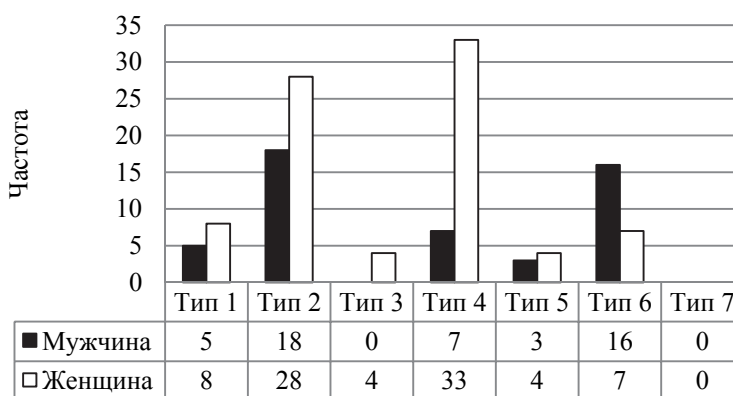


Рис. 5. Диаграмма встречаемости конституционных типов в группе больных

Fig. 5. Chart of encounter rates frequency of constitution types in sick group

Одной из важных прикладных задач является проверка однородности статистических данных [17].

Пусть имеются две выборки X_n и Y_n , описывающие один и тот же процесс и полученные в разное время или в разных условиях.

Пусть $X_n = \{X_1, \dots, X_n\}$ распределено по закону $F_1(x)$.

Пусть $Y_n = \{Y_1, \dots, Y_n\}$ распределено по закону $F_2(x)$.

Гипотеза однородности, т. е. совпадения распределения для первой и второй выборки, формулируется следующим образом:

$$H_0 : F_1(x) \equiv F_2(x).$$

Одним из часто используемых критериев проверки гипотезы однородности является критерий χ^2 Пирсона. В общем случае если осуществляется k последовательных серий независимых наблюдений, состоящих из n_1, n_2, \dots, n_k наблюдений, то для его применения необходимо рассчитать статистику:

$$\chi_n^2 = n \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k \frac{(v_{ij} - n_j v_i / n)^2}{n_j v_i} = n \left(\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k \frac{v_{ij}^2}{n_j v_i} - 1 \right), \quad (10)$$

где v_{ij} – число наблюдений i -го исхода в j -й серии; $n = n_1 + \dots + n_k$ – общее число наблюдений; s – количество интервалов группирования каждой выборки:

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k \frac{(v_{ij} - n_j p_i)^2}{n_j p_i}. \quad (11)$$

Эта статистика при $n \rightarrow \infty$ имеет распределение $\chi_{((s-1)(k-1))}^2$.

Критическая область имеет вид $\{t \geq t_\alpha\}$, $t_\alpha = F_2^{-1}(\alpha) = \chi_{(s-1)(k-1)}^{-1}(1-\alpha)$.

Например, для проверки гипотезы однородности данных для выборки здоровых и имеющих сердечно-сосудистые заболевания мужчин получены следующие данные.

Значение статистики $\chi_n^2 = 11,20$, значение квантиля χ_n^2 при заданном уровне значимости 0,05 равно $F_2^{-1}(0,95) = \chi_{(7-1)(2-1)}^{-1}(0,95) = 12,59$. Следовательно, дан-

ные не противоречат выдвигаемой гипотезе. По заболеваниям почек полученные результаты были аналогичными. Другими словами, тип конституции влияет на вид заболевания.

Заметим, что статистика критерия (10) имеет аналогичный вид и для проверки гипотезы независимости [17], если в качестве двумерной случайной величины выбирать величину, у которой первая компонента является типом конституции, а вторая – признаком «здоровые / больные».

Из участвующих при тестировании диагностической системы были выбраны 10 пациентов с известными диагнозами без группировки по полу. Тестирова-

ние в диагностической системе было проведено по двум вариантам: без прохождения предварительного теста (на определение типа конституции человека) и с учетом определения конституционных типов человека. При прохождении основного теста задается ряд вопросов о текущих симптомах. Вопросы задаются в произвольном порядке, в зависимости от определенной болезни. Большинство ответов «да» увеличивают вероятность диагноза болезни.

Далее определяются изменения вероятностей диагноза, которые зависят от полученных ответов. Симптомы диагнозов имеют разные частоты наблюдаемости. Следовательно, неопределенность появления для некоторых симптомов больше, чем для других. Суть взаимозависимости вопросов и ответов заключается в наблюдаемости симптомов.

При прохождении тестирования с учетом конституции человека некоторые названия диагнозов остаются такими же, как после прохождения основного теста без предварительного, а также появятся новые названия диагнозов в зависимости от типа конституции человека. После прохождения теста с учетом дополнительной информации также изменяется вероятность диагнозов.

Достоверность определения известного диагноза $F = f_1 P_d$ зависит от номера его места в списке результатов (коэффициент $f_1(N_d) \in [0;1]$) и от вероятности известного диагноза после прохождения тестирования в системе P_d . Здесь

$$f_1 = \frac{N_d}{N}, \quad (12)$$

где N_d – номер места в списке результатов проявления известного диагноза, N – общее число вариантов диагноза.

Проверка достоверности определения известного диагноза проводилась для двух тестирований (без учета определения конституции человека и с ним).

Таблица 3

Table 3

Изменения проверки достоверности определения диагноза
Changes in the verifying the accuracy of diagnosis

№ п/п	$F = f_1 P_d$	$F_{TM} = f_1 P_d$
1	0,570879979	0,570879979
2	0,69078482	0,750890256
3	0,482198202	0,463329364
4	0,69075452	0,69075452
5	0,7479503	0,7479503
6	0,379576889	0,449589147
7	0,379576889	0,492339929
8	0,533893572	0,533893572
9	0,381970019	0,46865726
10	0,512964083	0,577532225

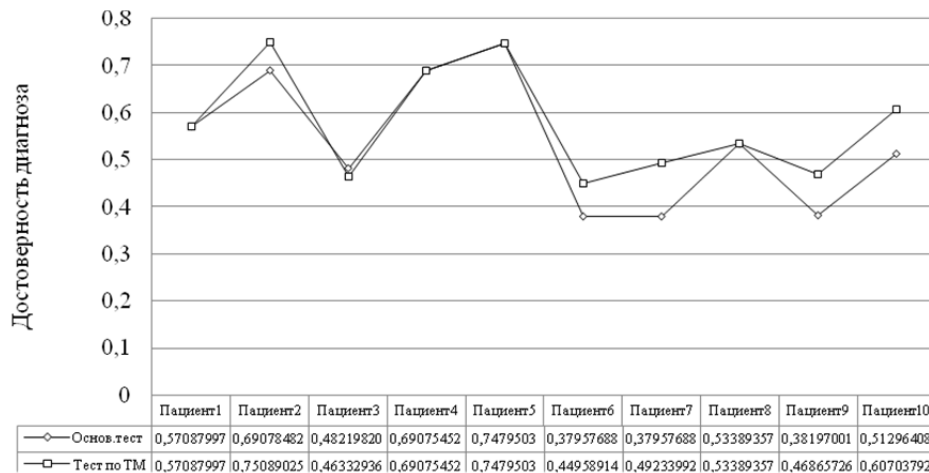


Рис. 6. Изменение достоверности известного диагноза

Fig. 6. Changes in the reliability of the known diagnosis

На графике приведена зависимость достоверности диагностики от расположения известного диагноза в полученном списке результатов работы экспертной системы (рис. 6).

Среднее значение достоверности двух тестов оценивается по формуле

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n}, \quad (13)$$

где F_i – значение i -й достоверности теста, n – общее число тестирований (пациентов).

Тогда среднее значение достоверности теста без учета конституции человека $\bar{F} = 0,537$, аналогично (13) для теста с учетом конституции человека $\bar{F}_{TM} = 0,577$. Следовательно, среднее значение достоверности теста с учетом конституции человека больше, чем при его отсутствии ($\bar{F}_{TM} > \bar{F}$), на 7,53 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены исследования на основе интеграции диагностического метода западной и восточной медицины среди 235 человек. Из них 102 были здоровы, а остальные – с известными диагнозами. Пациенты были разделены на две группы заболеваний: сердечно-сосудистые заболевания и заболевания почек. Из них 10 пациентов с известными диагнозами были выбраны для прохождения тестирования по диагностической экспертной системе, построенной на основе интеграции диагностики западной и восточной медицины. В результате показаны изменения вероятностей диагностики на

основе различных симптомов при определенной болезни у указанных пациентов. Показано, что достоверность диагноза при предварительном определении типа конституции человека выше в среднем на 7,53 %, чем при его отсутствии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование экспертных систем медицинской диагностики на базе нечеткой логики с применением методов системного моделирования / Т.В. Брейкин, Л.З. Камалова, С.Я. Попкова, А.А. Карташевская // Управление в сложных системах: межвузовский научный сборник УфГТУ. – Уфа, 1999. – С. 127–137.
2. Дошина А.Д. Экспертная система. Классификация. Обзор существующих экспертных систем // Молодой ученый. – 2016. – № 21 (125). – С. 756–758.
3. Власенко Т.А. Критерий диагностичности для модели медицинской диагностики // Вестник науки и образования. – 2015. – № 4 (6). – С. 57–58.
4. Шегал Б.Р. Модель выбора информации в экстренной медицинской диагностике // Сборник научных трудов НГТУ. – 2013. – № 2 (72). – С. 68–77.
5. Власенко Т.А., Шегал Б.Р. Критерий диагностичности для модели экстренной медицинской диагностики // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 2 (76). – С. 48–57.
6. Diagnostic test design for the medical decision support system "Aimedica" based on integration of the "European" and the "Eastern" medicines / M.G. Grif, B.R. Shegal, Yu. Ayush, S.V. Yastrebova // Proceedings International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, SIBIRCON-2017, Novosibirsk, 18–22 September 2017. – Новосибирск, 2017. – P. 209–214.
7. Гриф М.Г., Аюш Ю., Шегал Б.Р. Разработка диагностической медицинской экспертной системы с учетом конституционного типа пациента // Вестник АГТУ. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 2. – С. 81–90.
8. Гриф М.Г., Аюш Ю., Ястребова С.В. Проектирование диагностической экспертной системы на основе диагностических методов европейской и восточной медицины // Доклады АН ВШ РФ. – 2018. – № 2 (39). – С. 40–51.
9. Ластед Л.Б. Введение в проблему принятия решений в медицине: пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 282 с.
10. Стратонович Р.Л. Теория информации. – М.: Советское радио, 1975. – 424 с.
11. Усухбаяр Б. Логическое и методическое исследование основных принципов традиционной медицины для профилактики и диагностики заболеваний: дис. ... канд. мед. наук. – Улан-Батор, 2003. – 124 с.
12. Батсух Б. Исследование влияния биологического возраста и конституционных типов на ишемическую болезнь сердца: дис. ... канд. мед. наук. – Улан-Батор, 2010. – 127 с.
13. Эмпирический анализ тибетской системы классификации конституциональных типов человека / С.В. Калмыков, А.С. Цыбиков, Г.И. Занданова, О.А. Зинина // Вестник Бурятского государственного университета. – 2014. – № 3. – С. 93–100.
14. Баавгай Ч., Болдсайхан Б. Монгольская традиционная медицина. – Улан-Батор: Гос. бзд-во, 1990. – 380 с.
15. Чжуд-Ши. Основы тибетской медицины [Электронный ресурс]. – СПб.: Невский проспект, 1999. – URL: <http://www.rulit.me/books/chzhud-shi-osnovy-tibetskoj-mediciny-read-415656-1.html> (дата обращения: 26.03.2019).
16. Ayush Yu., Grif M.G. The computational method for self-diagnostical system // IBS Scientific Workshop Proceedings. – 2017. – N 4. – P. 67–69.
17. Постовалов С.Н., Чимитова Е.В., Карманов В.С. Математическая статистика: конспект лекций. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 140 с.

Аюуш Юмчмаа, аспирант кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – медицинская экспертная система. Имеет 15 публикаций. E-mail: a_yum@mail.ru

Ayush Yumchmaa, a postgraduate student at the automated systems department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are focused on medical expert systems. She has published 15 research papers. E-mail: a_yum@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-141-156

Analysis of medical expert system testing results based on the integration of traditional western and eastern medicine*

YU. AYUSH

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

a_yum@mail.ru

Abstract

Detecting diseases at an early stage can help to prevent diseases and treat them effectively. The choice of correct treatment depends on methods that are used in diagnosing diseases. However, diagnosing a disease at an early stage is difficult in the case of most diseases which are originally present or have similar symptoms. It is proposed to use an expert system based on the integration of traditional western and eastern medicine, which makes it possible to identify the causes of diseases as well as to follow a healthy lifestyle provided by eastern medicine. Differentiated assessment of relationships of human diseases gives an opportunity to distinguish constitutional-dependent symptoms of a disease and risk factors. It will also allow individualizing the prognosis and treatment, which, in turn, will improve the results of treatment of the disease. A medical diagnostic expert system based on the integration of traditional western and eastern medicine helps to observe additional factors of a disease, in particular, the influence of human anthropological and psychological data on the manifestation of the disease. To perform the above tasks, the probability theory, mathematical statistics and artificial intelligence were used. In the proposed model the choice of the information density of the diagnostic method can be performed in terms of both the vector of diagnoses made by the therapist in general and individual diseases. The creation of the knowledge base requires the integration of different sources. For this purpose, various types of morphisms which reflect the preferable diagnostic links between the basic human constitutional types and a set of western diagnoses are formed. In the research work the possibilities of the model and the main functions of the developed expert system are substantially expanded. They consist in issuing a list of hypotheses of differentiated diagnosis reliable from the point of view of the expert system on the basis of the entered and expected symptoms, existing or excluded related diagnoses. The article describes the results of medical diagnostic system testing and the results of statistical processing of received data.

Keywords: decision-making system, diagnostic, western and eastern medicine, health assessment, priori and posteriori probabilities, information entropy, testing of statistical hypothesis, certainty of diagnostics

* Received 14 November 2018.

REFERENCES

1. Breikin T.V., Kamalova L.Z., Popkova S.Ya., Kartashevskaya A.A. Proektirovanie ekspertnykh sistem meditsinskoj diagnostiki na baze nechetkoj logiki s primeneniem metodov sistemnogo modelirovaniya [Model of expert systems for medical diagnostics on the basis of fuzzy logic with application of system modeling method]. *Upravlenie v slozhnykh sistemakh* [Management in complex systems]. Ufa, 1999, pp. 127–137.
2. Doshina A.D. Ekspertnaya sistema. Klassifikatsiya. Obzor sushchestvuyushchikh ekspertnykh sistem [Expert system. Classification. The review of existing expert systems]. *Molodoi uchenyi – The Young Scientist*, 2016, no. 21 (125), pp. 756–758.
3. Vlasenko T.A. Kriterii diagnostichnosti dlya modeli meditsinskoj diagnostiki [Diagnosticity criteria for medical diagnostic model]. *Vestnik nauki i obrazovaniya – Bulletin of Science and Education*, 2015, no. 4 (6), pp. 57–58.
4. Shegal B.R. Model' vybora informatsii v ekstremnoi meditsinskoj diagnostike [The information choice model in emergency medical diagnostics]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 2 (72), pp. 68–77.
5. Vlasenko T.A., Shegal B.R. Kriterii diagnostichnosti dlya modeli ekstremnoi meditsinskoj diagnostiki [Diagnostic criterion for the model of emergency medical diagnostics]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 2 (76), pp. 48–57.
6. Grif M.G., Shegal B.R., Ayush Yu., Yastrebova S.V. Diagnostic test design for the medical decision support system "Aimedica" based on integration of the "European" and the "Eastern" medicines. *Proceedings International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, SIBIRCON-2017*, Novosibirsk, 18–22 September 2017, pp. 209–214.
7. Grif M.G., Ayush Yu., Shegal B.R. Razrabotka diagnosticheskoy medicinskoj ehkspertnoj sistemy s uchedom konstitucionnogo tipa pacienta [Development of diagnostic medical expert system subject to the constitutional type of a patient]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2018, no. 2, pp. 81–90.
8. Grif M.G., Ayush Yu., Yastrebova S.V. Proektirovanie diagnosticheskoi ekspertnoi sistemy na osnove diagnosticheskikh metodov evropejskoj i vostochnoi meditsiny [Design of a diagnostic expert system based on diagnostic methods of European and eastern medicines]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossijskoj Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 40–51. DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-40-51.
9. Lusted L.B. *Introduction to medical decision making*. Springfield, Ill., C.C. Thomas, 1968 (Russ. ed.: Lusted L.B. *Vvedenie v problemu prinyatiya reshenii v meditsine*. Moscow, Mir Publ., 1971. 282 p.).
10. Stratonovich R.L. *Teoriya informatsii* [Information theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1975. 424 p.
11. Usukhbayar B. *Logicheskoe i metodicheskoe issledovanie osnovnykh printsipov traditsionnoi meditsiny dlya profilaktiki i diagnostiki zabolevanii*. Diss. kand.med. nauk [Logical and methodical research of the basic principles of traditional medicine for prevention and diagnostics of diseases. PhD med. sci. diss.]. Ulaanbaatar, 2003. 124 p.
12. Batsukh B. *Issledovanie vliyaniya biologicheskogo vozrasta i konstitutsionnykh tipov na ishemicheskuyu bolezni' serdtsa*. Diss. kand. med. nauk [Research of influence biological age and the constitutional types on coronary heart disease. PhD med. sci. diss.]. Ulaanbaatar, 2010. 127 p.
13. Kalmykov S.V., Tsybikov A.S., Zandanova G.I., Zinina O.A. Empiricheskii analiz tibetskoj sistemy klassifikatsii konstitutsional'nykh tipov cheloveka [Empirical analysis of the Tibetan system of classification of constitutional human types]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Buryat State University*, 2014, no. 3, pp. 93–100.
14. Baavgai Ch., Boldsaikhan B. *Mongol'skaya traditsionnaya meditsina* [Mongolian traditional medicine]. Ulaanbaatar, State Publishing House, 1990. 380 p.

15. Chzhud-Shi. *Osnovy tibetskoi meditsiny* [Chzhud-Shi. The fundamentals of Tibetan medicine]. St. Petersburg, Nevskii prospect Publ., 1999. Available at: <http://www.rulit.me/books/chzhud-shi-osnovy-tibetskoy-mediciny-read-415656-1.html> (accessed 26.03.2019).

16. Ayush Yu., Grif M.G. The computational method for self-diagnostical system. *IBS Scientific Workshop Proceedings*, 2017, no. 4, pp. 67–69.

17. Postovalov S.N., Chimitova E.V., Karmanov V.S. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014. 140 p.

Для цитирования:

Аюуш Ю. Анализ результатов тестирования медицинской экспертной системы на основе интеграции традиционной западной и восточной медицины // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 141–156. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-141-156.

For citation:

Ayush Yu. Analiz rezul'tatov testirovaniya meditsinskoi ekspertnoi sistemy na osnove integratsii traditsionnoi zapadnoi i vostochnoi meditsiny [The outcome analysis of testing the medical expert system based on the integration traditional western and eastern medicine]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 141–156. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-141-156.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО–
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,
METROLOGY,
AND INFORMATION–
MEASUREMENT
SYSTEMS

УДК 535.411.854

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-157-166

Получение разности фазовых полей при использовании метода пошагового фазового сдвига^{*}

В.И. ГУЖОВ^а, Г.А. ПОЗДНЯКОВ^б, Е.Е. СЕРЕБРЯКОВА^с

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

^аv.guzhov@corp.nstu.ru ^бworlaff@gmail.com ^сsilver-kate94@mail.ru

В статье описывается новый способ определения разности между двумя полями фазовых значений. Метод определения разности фазовых полей может быть использован при исследовании напряженно-деформированного состояния объектов методами голографической интерферометрии или для измерения полей смещений и деформаций при исследовании больших объектов методами фазового структурированного освещения.

В последние годы широкое распространение получили системы для измерения профиля объектов, основанные на методе пошагового фазового сдвига (PSI). При интерференционных исследованиях возникает картина полос с периодом, определяемым длиной волны и углом между интерферирующими полосами. При структурированном освещении объекта синусоидальными полосами находится поле фазовых величин с периодом, определяемым величиной периода проецированной синусоидальной картины. По серии картин с известными значениями фазового сдвига находятся поля фаз, пропорциональные профилю поверхности с наклоном, соответствующим несущей частоте.

Для определения разности двух фазовых полей необходимо сначала устранить фазовую неоднозначность для каждого из них и только после этого вычитать искомые значения. В статье предлагается по найденным фазовым значениям генерировать новые серии синусоидальных полос с выбранными значениями сдвигов, затем определять поле разности фаз методом PSI.

Предлагаемый в статье способ позволяет вместо устранения фазовой неоднозначности для каждого состояния объекта использовать удаление неоднозначности только для искомой разности фаз. Если разность фазовых полей – более простая функция, чем профиль анализируемой поверхности, то достигается значительное упрощение при анализе переходов через период.

Ключевые слова: интерференция, голографическая интерферометрия, структурированное освещение, пошаговый фазовый сдвиг, определение разности фаз, фазовая неоднозначность, разность фаз, поле смещений, деформация

^{*} Статья получена 19 сентября 2018 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (гос. задание № 8.12007.2018/11.12).

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных способов расшифровки интерференционных изображений является метод пошагового фазового сдвига (phasesampling, phaseshiftinginterferometry – PSI) [1–6]. Метод пошагового фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерференционных картин при изменении фазы опорной волны на известную величину. Результат интерференции двух фронтов можно записать в виде

$$I(x, y) = I_0(x, y) (1 + V(x, y) \cos(\varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y))). \quad (1)$$

В этом выражении три неизвестных: $I_0(x, y)$ – средняя интенсивность, $V(x, y)$ – контраст, $\Delta\varphi(x, y) = \varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y)$ – фазовая разность между интерферирующими фронтами.

Для однозначного определения всех неизвестных необходимо не менее трех взаимно независимых уравнений. Взаимная независимость достигается, например, если в каждое из этих уравнений добавить постоянный фазовый сдвиг δ_i . В этом случае можно определить значения разности фаз $\Delta\varphi(x, y)$ из системы уравнений

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) (1 + V(x, y) \cos(\Delta\varphi(x, y) + \delta_i)), \quad (2)$$

где $i = 0, 1, \dots, m-1$, m – число фазовых сдвигов большее или равное трем.

Нами получена обобщенная схема определения разности фаз для различного числа сдвигов [7]:

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{\vec{I}^\perp \vec{C}}{\vec{I}^\perp \vec{S}}\right), \quad (3)$$

где $\vec{I} = (I_0, \dots, I_{m-1})^T$ – набор измеренных интенсивностей с различными фазовыми сдвигами δ_i ; $\vec{C} = (\cos \delta_0, \dots, \cos \delta_{m-1})^T$ и $\vec{S} = (\sin \delta_0, \dots, \sin \delta_{m-1})^T$ – набор синусов и косинусов от известных фазовых сдвигов; вектор \vec{C}^\perp – вектор, ортогональный \vec{C} ; \vec{S}^\perp – вектор, ортогональный \vec{S} . Размерность векторов определяется числом фазовых сдвигов m .

В системах определения профиля поверхности используются методы, основанные на структурированном освещении объекта [13]. Метод структурированной подсветки, который имитирует интерференционный метод, основан на освещении объекта на специально сформированном изображении синусоидальной решетки [14]. 3D-координаты поверхности определяют по величине искажения синусоидальной решетки [12, 13];

$$h = \alpha \cdot \Delta\varphi, \quad (4)$$

где $h(x, y)$ – профиль поверхности; α – системный коэффициент, зависящий от параметров оптической установки.

Метод пошагового фазового сдвига обеспечивает высокую точность измерения по всему полю объекта. Недостаток метода следующий: функция $\arctan(\)$ является периодической функцией (3), значения фазовых разностей определяются в пределах периода синусоидальной полосы, используемой для освещения.

Для определения деформаций необходимо определить поле смещений объекта в результате некоторой нагрузки. Для этого необходимо вычсть два профиля поверхности до и после воздействия некоторой силы.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ДВУХ ФАЗОВЫХ ПОЛЕЙ

Пусть есть два фазовых поля, которые образуются в результате простого наклона пластины (рис. 1). В левом столбце волновой фронт с наклоном, соответствующим двум периодам синусоидальной картины; волновой фронт с наклоном, соответствующим пяти периодам, и фазовое распределение разности этих фронтов (сверху вниз). В правом столбце показаны графики этих распределений по центральной строке.

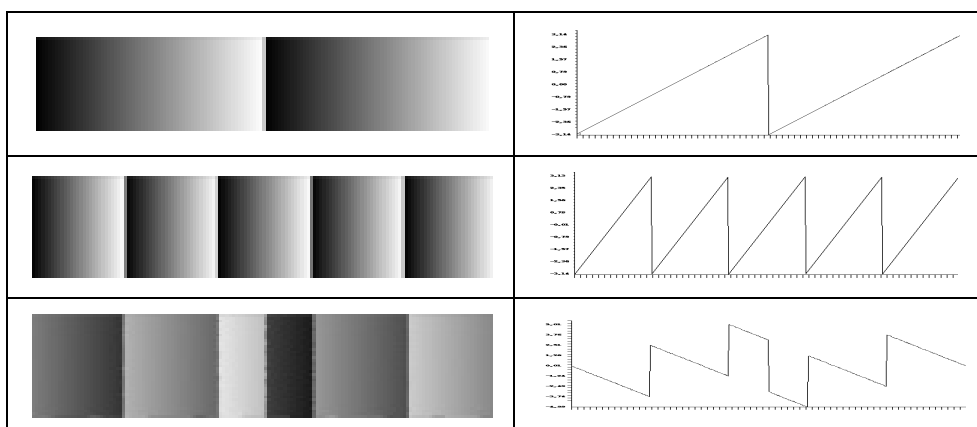


Рис. 1. Разность двух фазовых фронтов, определенных в пределах периода

Fig. 1. Subtraction of two phase fronts determined in the limit of a period

Из графика разности (нижний график в правом столбце) видно, что фазовая неоднозначность приводит к неправильному определению фазовой разности при прямом определении разности. Для правильного определения разности фаз необходимо сначала устранить фазовую неоднозначность для каждого из полей и только потом определять разность между ними (рис. 2).

На рис. 2 показано фазовое распределение до устранения фазовой неоднозначности (левый столбец) и после устранения (правый столбец).

Таким образом, для определения разности необходимо устранить фазовую неоднозначность в исходном фазовом поле и в фазовом поле после деформации объекта и только затем определять разницу между ними. В этом случае получается правильное значение разности фаз.

Устранение фазовой неоднозначности – достаточно сложная операция, она может приводить к ошибкам при восстановлении полной фазы [14, 15].

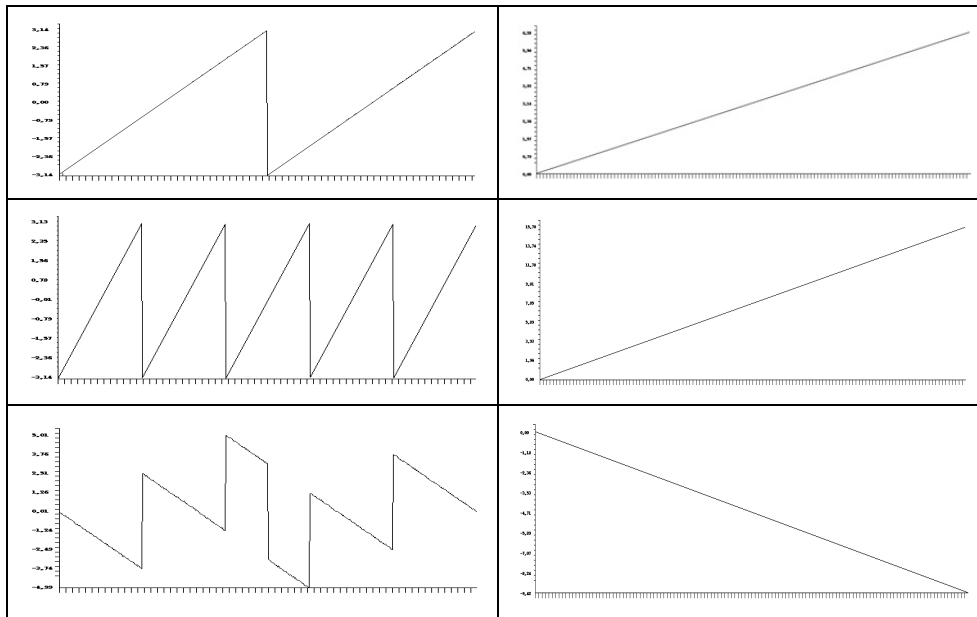


Рис. 2. Разность двух фазовых фронтов после устранения фазовой неоднозначности

Fig. 2. Subtraction of two phase fronts after eliminating phase ambiguity

Рассмотрим, как можно упростить процесс определения разности между двумя фазовыми полями.

2. НАХОЖДЕНИЕ РАЗНОСТИ ФАЗОВЫХ ПОЛЕЙ БЕЗ УСТРАНЕНИЯ ФАЗОВОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ

Можно определить фазовое распределение $\varphi_p(x, y)$ для первого состояния объекта и $\varphi_r(x, y)$ – для второго состояния.

Для нахождения разности фазовых полей можно воспользоваться тем, что в результате сложения двух волновых полей можно зарегистрировать интенсивность, пропорциональную следующему выражению:

$$I_i(x, y) = \cos(\varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y) + \delta_i), \quad (5)$$

где $\varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y)$ – разность фаз для первого и второго состояний; δ_i – произвольно выбранный нами фазовый сдвиг.

Для четырех сдвигов $\delta_0 = 0^\circ$, $\delta_1 = 90^\circ$, $\delta_2 = 180^\circ$, $\delta_3 = 270^\circ$ получим серию синусоидальных картин, показанных в левом столбце на рис. 3 слева. По этим картинкам с помощью выражения (3) определяется разность фаз (рис. 3, справа).

Разность тоже имеет фазовую неоднозначность (нижний график на рисунке). Но в этом случае фазовую неоднозначность необходимо устранять только один раз для разности фаз вместо двух для каждого из фазовых фронтов, соответствующих двум состояниям объекта. В результате разность фаз определяется правильно.

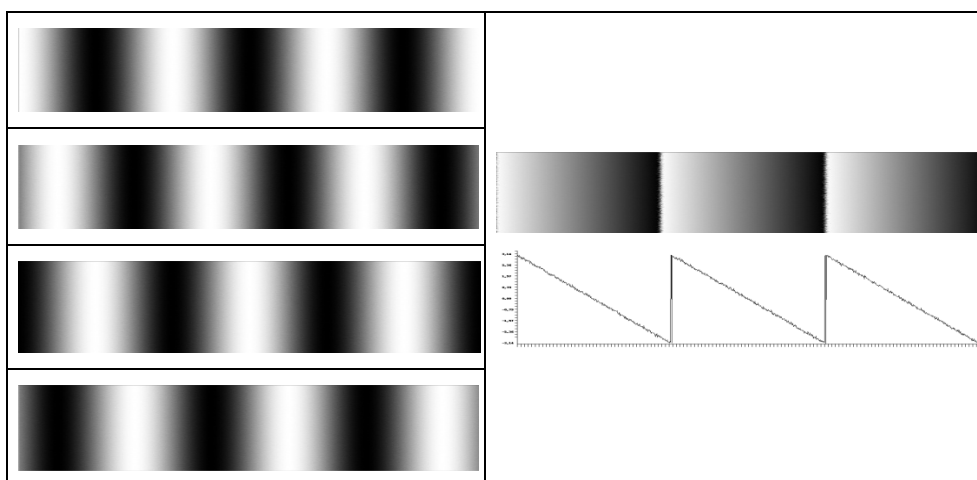


Рис. 3. Интерференционные картины (слева) и соответствующие им разности фаз (справа)

Fig. 3. A series of interference patterns corresponding to the phase difference (left column) and their corresponding phase differences (right column)

Поле разности фазовых полей в экспериментах обычно имеет достаточно простой вид, и поэтому фазовую неоднозначность устранять легче.

Измерим поле смещений балки, один конец которой закреплен, а на другой конец прилагается некоторая нагрузка. Для определения профиля объект освещается синусоидальными полосами. По набору зарегистрированных картин методом пошагового фазового сдвига определяется фазовое распределение поля, отраженного от объекта.

Пусть длина балки 50 см. Проецируем на нее картину полос с разрешением 4000×2000 точек, число полос 20 (200 точек на полосу). В результате измерений мы получим поле фаз с периодом, определяемым размером проецируемых синусоид (рис. 4).

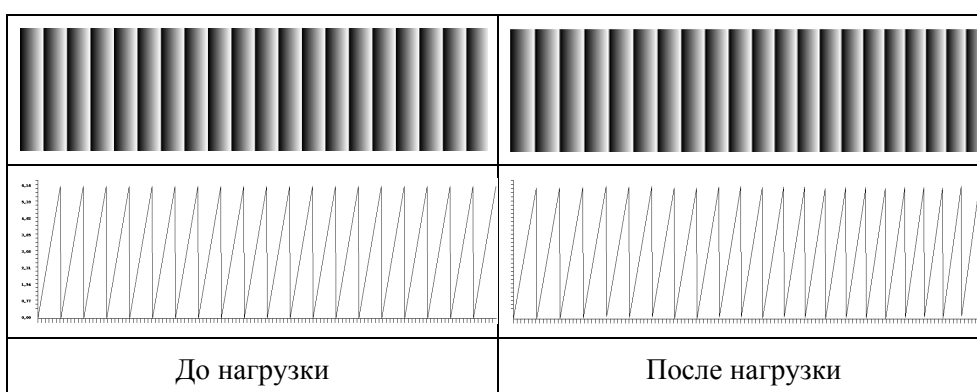


Рис. 4. Фазовое распределение от объекта при проекции на него 20 полос

Fig. 4. Phase distribution from the object by projection of 20 bands

Профиль поверхности до и после нагрузки пропорционален фазовым распределениям (4) с наклоном, соответствующим несущей частоте синусоид.

При упругих деформациях величина смещения небольшая, поэтому на рис. 4 отличия определить сложно. Однако, если воспользоваться выражением (5) для определения синусоидального поля, такие отличия становятся хорошо видны (рис. 5).

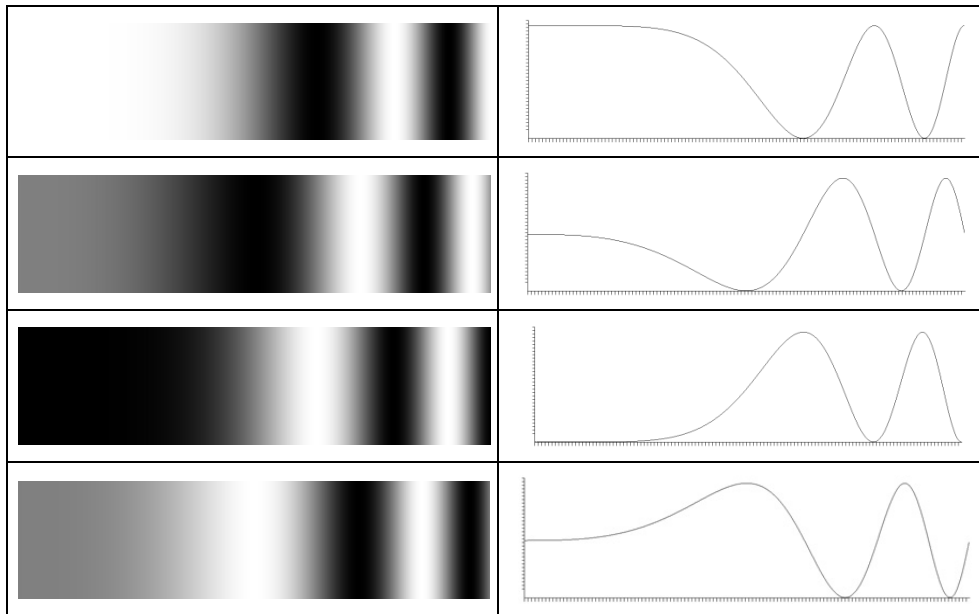


Рис. 5. Серия сгенерированных синусоидальных картин, соответствующих полю смещений объекта до и после деформаций (слева) и графики по центральной строке (справа)

Fig. 5. A series of generated sinusoidal patterns corresponding to the object displacement field before and after deformations (left column) and graphs along the central row (right column)

Интерференционные картины, показанные на рис. 5, получены со сдвигами $\delta_0 = 0^\circ$, $\delta_1 = 90^\circ$, $\delta_2 = 180^\circ$, $\delta_3 = 270^\circ$. После расшифровки методом пошагового фазового сдвига получим фазовое распределение, пропорциональное полю смещений (рис. 6).

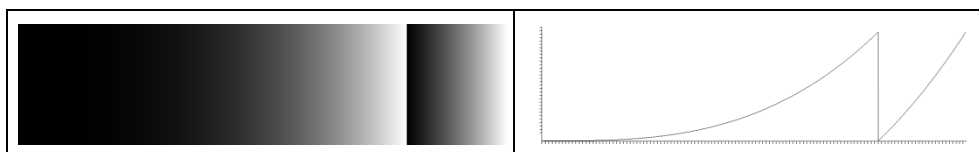


Рис. 6. Фазовое распределение, пропорциональное полю смещений, и его график по центральной строке

Fig. 6. phase distribution proportional to the displacement field, and its graph on the central line

Как видно из рис. 4, для устранения фазовой неоднозначности для фазовых распределений волнового фронта, отраженного от объекта, необходимо анализировать 20 точек перехода через 2π , а для разности фазовых полей (рис. 6) необходимо провести анализ только в одной точке.

После устранения фазовой неоднозначности график фазового распределения совпадет с точностью до множителя с теоретическим графиком прогиба балки, показанным на рис. 7.

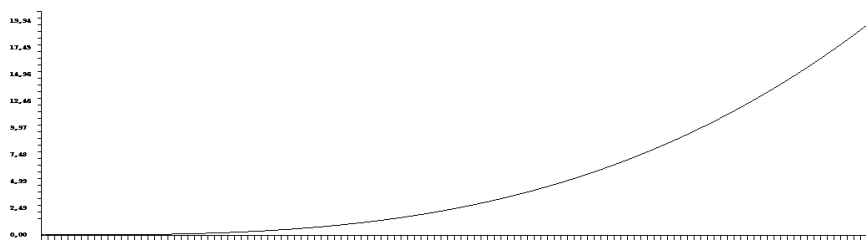


Рис. 7. График прогиба балки

Fig. 7. Graph of girder bending

Метод может применяться для исследования напряженно-деформированного состояния объектов методами голографической интерферометрии и при измерениях полей смещений методами структурированного освещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод пошагового фазового сдвига получил в последние годы широкое распространение. Это вызвано возможностью определения разности фаз, пропорциональных профилю изучаемого объекта, по всему полю с высокой точностью. Для определения деформаций методами голографической интерферометрии и методами структурированного освещения необходимо определять поля смещений поверхности до и после воздействия на объект некоторой силы.

Традиционно для нахождения разности определяется профиль объекта до и после нагрузки. Для этого необходимо устранять фазовую неоднозначность для каждого измеренного поля фаз. Профиль объекта может быть достаточно сложным. Поэтому анализ переходов через 2π представляет сложную проблему.

В статье описан новый способ, основанный на искусственном формировании синусоидальных полос, из которых методом пошагового фазового сдвига можно определить искомую разность фазовых полей. Поскольку распределение этой разности в большинстве практических приложений – более простая функция, чем функция, описывающая профиль поверхности, то процедура устранения фазовой неоднозначности может быть существенно упрощена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carre P. Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures // Metrologia. – 1966. – Vol. 2 (1). – P. 13–23.
2. Crane R. Interference phase measurement // Applied Optics. – 1969. – Vol. 8, N 3. – P. 538–542.
3. Creath K. Phase-measurement interferometry techniques // Progress in Optics. – 1988. – Vol. 26. – P. 349–393.

4. Hariharan P., Oreb B.F., Brown N. A digital phase-measurement system for real-time holographic interferometry // Optics Communication. – 1982. – Vol. 41, N 6. – P. 393–396.
5. Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic principles and new systems // Laser Focus. – 1982. – Vol. 18, N 5. – P. 65–67.
6. Wyant J.C., Creath K. Recent advances in interferometric optical testing // Laser Focus. – 1985. – Vol. 21, N 11. – P. 118–132.
7. Ильиных С.П., Гужов В.И. Обобщенный алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // Автометрия. – 2002. – № 3. – С. 123–126.
8. Caspi D., Kiryati N., Shamir J. Range imaging with adaptive color structured light // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1998. – Vol. 20, N 5. – P. 470–480.
9. Zhang L., Curless B., Seitz S.M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming // International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission. – Padova, Italy, 2002. – P. 24–26.
10. Horn E., Kiryati N. Toward optimal structured light patterns // Image Vision Computing. – 1999. – Vol. 17, N 2. – P. 87–97.
11. Salvi J., Batlle J., Mouaddib E. A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement // Pattern Recognition Letters. – 1998. – Vol. 19 (11). – P. 1055–1065.
12. Гужов В.И., Ильиных С.П., Уберт А.Г. Проекционный метод измерения рельефа объекта // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1. – С. 23–28.
13. Zhang S. High-resolution, real-time 3-D shape measurement: Dr of Philosophy in Mechanical Engineering diss. – Stony Brook, NY, 2005. – 127 p.
14. Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия. – 1992. – № 6. – С. 24–30.
15. Решение проблемы фазовой неоднозначности методом целочисленной интерферометрии / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, А.Р. Вагизов // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 85–91.

Гужов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – высокоточные измерительные системы. Имеет более 200 публикаций. E-mail: v.guzhov@corp.nstu.ru

Поздняков Григорий Александрович, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – компьютерные голографические измерительные системы. Имеет 6 публикаций. E-mail: worlaff@gmail.com

Серебрякова Екатерина Евгеньевна, ассистент кафедры сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – исследование объектов методами структурированного освещения. Имеет 9 публикаций. E-mail: silver-kate94@mail.ru

Guzhov Vladimir Ivannovich, D.Sc. (Eng.), professor at the department of data acquisition and processing in the Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is high-accuracy measurement systems. He is the author of more than 200 publications. E-mail: v.guzhov@corp.nstu.ru

Pozdnyakov Grogory Alexandrovich, a postgraduate student in the Novosibirsk State Technical University. His research interests include computer holographic measurement systems. He has published 6 research papers. E-mail: worlaff@gmail.com

Serebryakova Ekaterina Evgenievna, a teaching assistant at the department of data acquisition and processing in the Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is study of objects by structural illumination methods. She is the author of 9 publications. E-mail: silver-kate94@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-157-166

Obtaining phase difference by using the step-by-step phase shift method*V.I. GUZHOV^a, G.A. POZDNYAKOV^b, E.E. SEREBRYAKOVA^c

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

^av.guzhov@corp.nstu.ru ^bworlaff@gmail.com ^csilver-kate94@mail.ru**Abstract**

The article describes a new method for determining the difference between two fields of phase values. The method of determining the difference of phase fields can be used to study the stress-strain state of objects using holographic interferometry methods or to measure displacement and deformation fields when studying large objects by phase-structured illumination methods.

In recent years, systems for measuring object profiles based on the method of incremental phase shift (PSI) have become widespread. In interference studies, a pattern of bands appears with a period determined by the wavelength and the angle between the interfering bands. With a structured illumination of the object with sinusoidal stripes there is a field of phase values with a period determined by the period of the projected sinusoidal pattern. Based on a series of pictures with known phase shift values, phase fields proportional to the surface profile with a slope corresponding to the carrier frequency are found.

To determine the difference between the two phase fields, it is necessary first to eliminate the phase ambiguity for each of them and then subtract the desired values. The article proposes to generate new series of sinusoidal bands with selected values of shifts from the found phase values and then to determine the phase difference field using the PSI method.

The method proposed in the article makes it possible to remove ambiguity only for the sought phase difference instead of eliminating phase ambiguities for each state of an object. If the difference in phase fields is a simpler function than the profile of the analyzed surface, then the analysis of transitions over a period is significantly simplified.

Keywords: interference, holographic interferometry, structured illumination, stepwise phase shift, phase difference determination, phase ambiguity, phase difference, displacement field, deformation

REFERENCES

1. Carre P. Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures. *Metrologia*, 1966, vol. 2 (1), pp. 13–23.
2. Crane R. Interference phase measurement. *Applied Optics*, 1969, vol. 8, no. 3, pp. 538–542.
3. Creath K. Phase-measurement interferometry techniques. *Progress in Optics*, 1988, vol. 26, pp. 349–393.
4. Hariharan P., Oreb B.F., Brown N. A digital phase-measurement system for real-time holographic interferometry. *Optics Communication*, 1982, vol. 41, no. 6, pp. 393–396.
5. Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic principles and new systems. *Laser Focus*, 1982, vol. 18, no. 5, pp. 65–67.
6. Wyant J.C., Creath K. Recent advances in interferometric optical testing. *Laser Focus*, 1985, vol. 21, no. 11, pp. 118–132.
7. Ilyinykh S.P., Guzhov V.I. A generalized decoding algorithm for interferograms using phase stepping. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2002, no. 3, pp. 103–106. Translated from *Avtometriya*, 2002, no. 3, pp. 123–126.

* Received 19 September 2018.

The work was done with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State Task No. 8.12007.2018 / 11.12).

8. Caspi D., Kiryati N., Shamir J. Range imaging with adaptive color structured. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, vol. 20, no. 5, pp. 470–480.
9. Zhang L., Curless B., Seitz S.M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. *International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, Padova, Italy, 2002, pp. 24–26.
10. Horn E., Kiryati N. Toward optimal structured light patterns. *Image Vision Computing*, 1999, vol. 17, no. 2, pp. 87–97.
11. Salvi J., Battie J., Mouaddib E. A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement. *Pattern Recognition Letters*, 1998, vol. 19 (11), pp. 1055–1065.
12. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Ubert A.G. Proektsionnyi metod izmereniya rel'efa ob"ekta [Projection method for measuring the topography of the object]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1, pp. 23–28.
13. Zhang S. *High-resolution, real-time 3-D shape measurement*. Dr of Philosophy in Mechanical Engineering diss. Stony Brook, NY, 2005. 127 p.
14. Guzhov V.I., Solodkin Yu.N. The accuracy of determining the total phase difference in integer interferometers. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 1992, no. 6, pp. 23–28. Translated from *Avtometriya*, 1992, no. 6, pp. 24–30.
15. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Kuznetsov R.A., Vagizov A.R. Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2013, vol. 49, iss. 2, pp. 178–183. Translated from *Avtometriya*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 85–91.

Для цитирования:

Гужов В.И., Поздняков Г.А., Серебрякова Е.Е. Получение разности фазовых полей при использовании метода пошагового фазового сдвига // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 157–166. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-157-166.

For citation:

Guzhov V.I., Pozdnyakov G.A., Serebryakova E.E. Poluchenie raznosti fazovykh polei pri ispol'zovanii metoda poshagovogo fazovogo sdviga [Obtaining phase difference by using the step-by-step phase shift method]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 157–166. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-157-166.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,
METROLOGY,
AND INFORMATION-
MEASUREMENT
SYSTEMS

УДК 535.8, 535.6.07, 621.38

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-167-180

Система цветоделения с характеристиками, близкими к XYZ МКО 1931 г.*

В.Л. ЖБАНОВА

214013, РФ, г. Смоленск, Энергетический пр., 1, филиал Научно исследовательского университета МЭИ

vera-zhbanova@yandex.ru

В работе представлены исследования системы цветоделения $X_1X_2Y_1Z_1$ и его цветового пространства $M'_2N'_2P'_2$. Проведен анализ этих двух систем на соответствие колориметрической системе XYZ МКО 1931 г. Система цветоделения разработана для согласования систем регистрации обработки цветного изображения. Приемники $X_1X_2Y_1Z_1$ основаны на наборах цветных оптических стекол под характеристику матрицы *Sony*. Кривые подбирались таким образом, чтобы их форма и пики максимально совпадали с цветовым пространством $M'_2N'_2P'_2$. Были получены кривые, немного отличные по форме, однако был принят наилучший вариант из возможных. Цветовое пространство $M'_2N'_2P'_2$ имеет характеристики, схожие с XYZ МКО 1931 г., при этом является самостоятельным и даже имеет улучшенный цветовой треугольник с минимальным включением нереальных цветов. Приведены коэффициенты перехода из разработанных систем в систему XYZ, необходимые для более качественной оценки координат цветности и корректного перехода в другие колориметрические системы, в том числе равноконтрастные. Дано описание методики проведения математического моделирования для нахождения координат цвета и цветности образцов в разработанном цветовом пространстве $M'_2N'_2P'_2$ и созданной на его основе системы цветоделения $X_1X_2Y_1Z_1$. Для объективной оценки качества разработанных систем было найдено изменение цветности зеленых, желто-зеленых и желтых светофильтров. Указаны значения экспериментально найденных координат цветности выбранных светофильтров на оптико-электронной установке. Дан анализ экспериментальных и рассчитанных значений, на основе которого сделаны выводы по дальнейшей работе с системой цветоделения $X_1X_2Y_1Z_1$.

Ключевые слова: система цветоделения, колориметр, светофильтры, приемники, матрица, колориметрическая система, равноконтрастная система, цветовое различие

* Статья получена 12 сентября 2018 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00176.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые устройства регистрации цветных изображений основаны на различных системах цветоделения и по всем параметрам относятся к колориметрам. Основной проблемой этих устройств является метрологическое обеспечение цветowych измерений.

Широко применяются системы цветоделения с пространственным разделением светового потока, основанные на шаблонах светофильтров с основными цветами: красным, синим и зеленым. Эти системы обладают недостатками, не устраненными ни в одной модификации. Основной недостаток – характеристики светофильтров матриц.

Отдельно взятый ПЗС-элемент может регистрировать только яркость точки изображения [1, 2]. Для захвата цветного изображения перед ПЗС-элементом необходимо установить пленочный светофильтр. У каждой матрицы светофильтры имеют разные характеристики, согласующиеся с устройствами обработки и воспроизведения изображения лишь математически с помощью алгоритмов [3–6]. У каждой компании определен алгоритм обработки цветовой информации, позволяющий лишь частично исключить потери информации о цвете. Поэтому устройства захвата и обработки изображений требуют улучшения показателей уже на стадии ввода цвета – на техническом уровне.

На программном уровне в основу выбора цветowych пространств были положены основные цвета кинескопов телевизионных приемников, которые получены за счет свечения трех люминофоров. В соответствии с этим приняты следующие основные цвета колориметрических систем телевидения *NTSC* (американская система Национального комитета телевизионных систем) и *EC* (Европейский стандарт). Система *NTSC* является теоретической. *EC* основана на реальных цветах люминофоров. Система *SECAM* используется для определения спектральных характеристик передающих камер [3, 7].

Кривые сложения систем *NTSC* и *EC* имеют отрицательные ветви. Но так как в передающей камере нет возможности воспроизвести отрицательные значения кривых, то в реальных условиях приходится воспроизводить лишь положительные ветви, отбрасывая отрицательные. В результате *система цветов камеры в принципе не согласуется с системой цветового зрения человека*. Как следствие этого, при передаче реальных цветов возникают искажения.

Устройства регистрации и воспроизведения изображений должны быть согласованы на техническом и программном уровнях. В наши дни находят широкое применение дисплеи с цветовым охватом, включающим все цвета, видимые человеком. Дисплеи на квантовых точках способны охватить уже более 70 % цветового диапазона. Но оправдывается ли такой большой цветовой охват воспроизведения изображений при малом цветовом диапазоне регистрируемых приборов?

В основном все современные передающие цифровые камеры работают на системе *RGB*, разработанной и утвержденной в 1931 г. Международной комиссией по освещению. При фото- и видеосъемке цифровые устройства регистрируют только небольшой цветовой охват, составляющий около 40 % от всего воспринимаемого человеческим глазом цветового диапазона.

Поэтому при использовании в цифровом колориметре современных систем цветоделения не может быть достигнуто удовлетворительное согласова-

ние систем регистрации и обработки изображения, и требуется разработка фотоприемника со спектральной характеристикой, согласованной с колориметрической системой с цветовым треугольником, охватывающим весь цветовой диапазон, воспринимаемый человеком. Примером такого треугольника является международная колориметрическая система XYZ МКО 1931 г., используемая как в качестве основной, так и промежуточной системы для расчета цветовых характеристик различных колориметрических систем [7, 8].

Ранее были разработаны приемники на основе характеристик системы XYZ МКО, однако при их исследовании обнаружилось слишком большие цветовые сдвиги [9]. Поэтому было предложено разрабатывать системы цветоделения под кривые сложения цветовых пространств, цветовые треугольники которых имеют минимальное включение нереальных цветов.

1. СИСТЕМА ЦВЕТОДЕЛЕНИЯ

В результате исследований было разработано цветовое пространство $M_2N_2P_2$ [10]. Пространство доработано до $M'_2N'_2P'_2$ для более удобного применения коэффициентов перехода в систему XYZ. Координаты нового цветового треугольника: $M'_2(0,74; 0,26)$, $N'_2(0; 1)$, $P'_2(0; -0,08)$. Цветовое пространство $M'_2N'_2P'_2$ имеет характеристики, схожие с XYZ МКО 1931 г., при этом является самостоятельным и даже имеет улучшенный цветовой треугольник с минимальным включением нереальных цветов (рис. 1).

Коэффициенты перехода необходимы для более качественной оценки координат цветности в системе XYZ и корректного перехода в другие колориметрические системы, в том числе равноконтрастные.

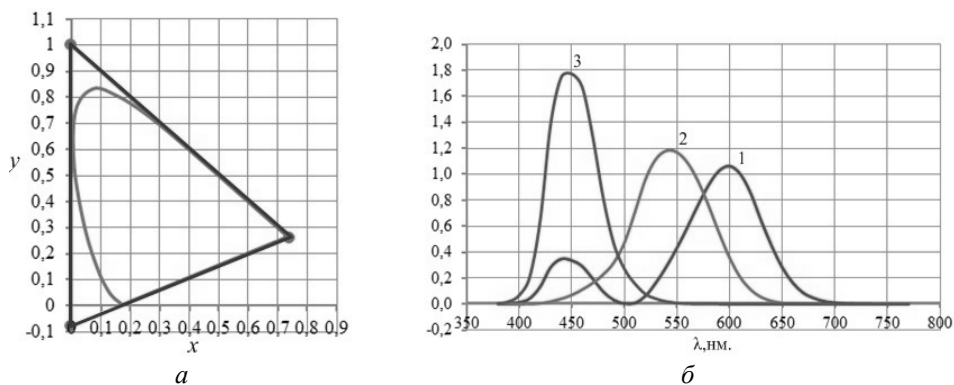


Рис. 1. Цветовое пространство $M'_2N'_2P'_2$:

a – цветовой треугольник пространства в системе xy ; b – кривые сложения:

$$1 - \overline{m'_2(\lambda)}; 2 - \overline{n'_2(\lambda)}; 3 - \overline{p'_2(\lambda)}$$

Fig. 1. The $M'_2N'_2P'_2$ color space:

a – a color triangle of space in the xy system; b – addition curves: 1 is $\overline{m'_2(\lambda)}$;

$$2 \text{ is } \overline{n'_2(\lambda)}; 3 \text{ is } \overline{p'_2(\lambda)}$$

Коэффициенты перехода из системы $M'_2N'_2P'_2$ в систему XYZ МКО, рассчитанные по методике [7], имеют следующий вид:

$$X_{M2'} = 1; \quad X_{N2'} = 0; \quad X_{P2'} = 0;$$

$$Y_{M2'} = 0,3514; \quad Y_{N2'} = 0,7227; \quad Y_{P2'} = -0,0741;$$

$$Z_{M2'} = 0; \quad Z_{N2'} = 0; \quad Z_{P2'} = 1,$$

где $X_{M2'}$, $X_{N2'}$, $X_{P2'}$ – коэффициенты для вычисления координаты цвета X в системе XYZ МКО; $Y_{M2'}$, $Y_{N2'}$, $Y_{P2'}$ – коэффициенты для вычисления координаты цвета Y в системе XYZ МКО; $Z_{M2'}$, $Z_{N2'}$, $Z_{P2'}$ – коэффициенты для вычисления координаты цвета Z в системе XYZ МКО.

На основе цветных оптических стекол была разработана система цветоделения для цифрового колориметра. Каждый набор светофильтров (СФ) позволяет создать приемники $X1$, $X2$, $Y1$ и $Z1$, корректирующие спектральную характеристику матрицы *Sony icx274* выбранной видеокамеры *PL-B959* под кривые сложения разработанного цветового треугольника $M'_2N'_2P'_2$. Кривые подбирались таким образом, чтобы их форма и пики максимально совпадали. Полученные характеристики представлены на рис. 2. Для каждого вида приемника был подобран свой набор корректирующих СФ, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Набор корректирующих светофильтров

A set of corrective light filters

Система $M'_2N'_2P'_2$	Приемники $X1X2Y1Z1$	Набор корректирующих СФ
для M'_2	$X1$	СЗС23, ОС5, ОС17
	$X2$	СЗС9, ФС1, ЖС3, СС15
для N'_2	$Y1$	ЗС10, СЗС23, ЖЗС6
для P'_2	$Z1$	ЖС3, СС15, СЗС21

Характеристики системы $M'_2N'_2P'_2$ и приемников $X1X2Y1Z1$ представлены на рис. 2.

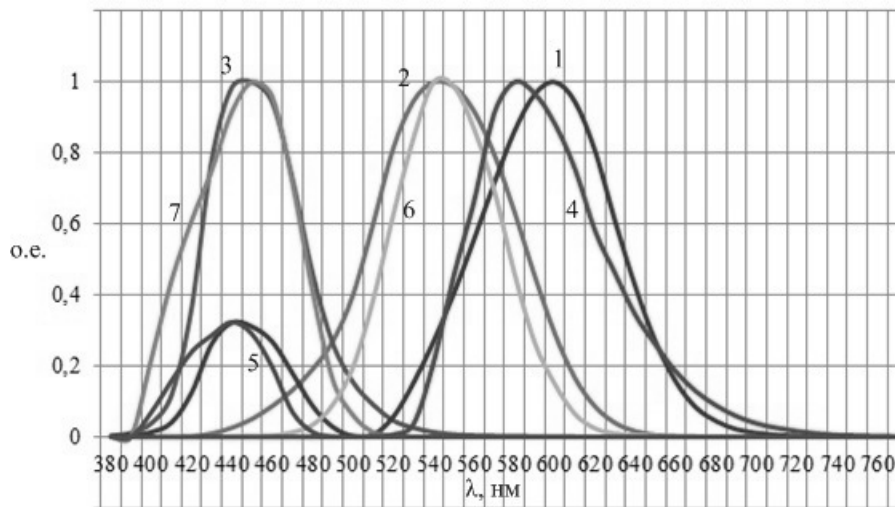


Рис. 2. Кривые сложения системы $M'_2N'_2P'_2$:

1 – $\overline{m'_2(\lambda)}$; 2 – $\overline{n'_2(\lambda)}$; 3 – $\overline{p'_2(\lambda)}$ и характеристики приемников X1X2Y1Z1:
4 – $\overline{x_1(\lambda)}$; 5 – $\overline{x_2(\lambda)}$; 6 – $\overline{y_1(\lambda)}$; 7 – $\overline{z_1(\lambda)}$

Fig. 2. The addition curves of the system $M'_2N'_2P'_2$:

1 – $\overline{m'_2(\lambda)}$; 2 – $\overline{n'_2(\lambda)}$; 3 – $\overline{p'_2(\lambda)}$ and receiver characteristics X1X2Y1Z1:
4 – $\overline{x_1(\lambda)}$; 5 – $\overline{x_2(\lambda)}$; 6 – $\overline{y_1(\lambda)}$; 7 – $\overline{z_1(\lambda)}$

Если качественно оценить полученные характеристики, то по рисунку видно, что кривые красного спектра имеют пики на разной длине волны, отличной на 15 нм. Также кривые немного отличны по форме. Однако стоит отметить, что полученные характеристики основаны на цветных оптических стеклах, имеющих ограниченный перечень СФ. Поэтому был принят наилучший вариант из возможных. Необходимо провести исследование разработанной системы цветоделения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для количественной оценки характеристик разработанной системы X1X2Y1Z1 необходимо найти координаты цветности исходного цветового треугольника $M'_2N'_2P'_2$ исследуемой системы и сравнить их с XYZ МКО.

Координаты каждого цвета в диапазоне от 400 до 770 нм рассчитываются по следующим формулам [11]:

$$X1 = \int_{400}^{770} \overline{x_1(\lambda)} d\lambda,$$

$$X2 = \int_{400}^{770} \overline{x_2(\lambda)} d\lambda,$$

$$Y1 = \int_{400}^{770} \overline{y_1}(\lambda) d\lambda,$$

$$Z1 = \int_{400}^{770} \overline{z_1}(\lambda) d\lambda,$$

где $\overline{x_1}(\lambda)$, $\overline{x_2}(\lambda)$, $\overline{y_1}(\lambda)$, $\overline{z_1}(\lambda)$ – характеристики системы $X1X2Y1Z1$. Далее показатели $X1$ и $X2$ складываются для формирования координаты цвета по красному спектру.

Для системы $M'_2N'_2P'_2$ формулы примут следующий вид:

$$M'_2 = \int_{400}^{770} \overline{m'_2}(\lambda) d\lambda,$$

$$N'_2 = \int_{400}^{770} \overline{n'_2}(\lambda) d\lambda,$$

$$P'_2 = \int_{400}^{770} \overline{p'_2}(\lambda) d\lambda,$$

где $\overline{m'_2}(\lambda)$, $\overline{n'_2}(\lambda)$, $\overline{p'_2}(\lambda)$ – удельные координаты цвета для системы $M'_2N'_2P'_2$.

Полученные координаты цвета переводятся в систему XYZ МКО 1931 г. по коэффициентам перехода. Далее находятся координаты цветности (x ; y) по следующим формулам [7, 11]:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad (1)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (2)$$

где X , Y , Z – координаты цвета; x , y – координаты цветности в системе xy .

Так как обе системы соответствуют XYZ МКО 1931 г., то полученные координаты x и y должны указывать на источник с равноэнергетическим спектром, который в системе XYZ имеет координаты $E(0,333; 0,333)$. Для $M'_2N'_2P'_2$ координаты источника E составили $(0,333; 0,333)$, для $X1X2Y1Z1$ – $(0,327; 0,339)$. Если сравнить с эталонным значением системы XYZ МКО, то получим, что для $X1X2Y1Z1$ отличие равно $\Delta x = 0,006$; $\Delta y = 0,006$. По ГОСТ Р 52489-2005* изменения по Δx и Δy не должны превышать 0,01. Поэтому разработанный набор светофильтров удовлетворяет требованиям ГОСТа. Стоит отметить, что без коэффициентов пересчета координаты равноэнергетического источника для системы $X1X2Y1Z1$ – $(0,325; 0,342)$, тогда

* ГОСТ Р 52489-2005. Материалы лакокрасочные. Колориметрия. Часть 1. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2005. – 12 с.

$\Delta x = 0,008$; $\Delta y = 0,009$. Последнее показывает влияние коэффициентов перехода на получение адекватного значения координат цветности объекта.

Перед началом экспериментальных исследований необходимо определить координаты цвета образцовых светофильтров из цветного оптического стекла в колориметрической системе XYZ для последующего сравнения с результатами эксперимента. Расчет выполняется численным методом. Интегрирование в формулах по $d\lambda$ заменяется суммированием по $\Delta\lambda$, при этом весь видимый участок разбивается на узкие одинаковые интервалы по 10 нм.

Расчет координат цвета производится следующим образом [8]:

$$X = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (3)$$

$$Y = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (4)$$

$$Z = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda , \quad (5)$$

где $\varphi(\lambda)$ – спектральная энергетическая плотность потока излучения; $\tau(\lambda)$ – спектральный направленный коэффициент пропускания светофильтра; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – удельные координаты цвета для системы XYZ.

При расчете координат цветности светофильтров в системе $M'_2 N'_2 P'_2$ удельные координаты цвета $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ заменяются на $\bar{m}'_2(\lambda)$, $\bar{n}'_2(\lambda)$, $\bar{p}'_2(\lambda)$ в формулах (3)–(5).

Для анализа приемника $X1X2Y1Z1$ необходимо рассчитывать $X1$ и $X2$ отдельно, тогда формулы (1)–(3) примут следующий вид:

$$X1 = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{x}_1(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (6)$$

$$X2 = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{x}_2(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (7)$$

$$Y1 = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{y}_1(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (8)$$

$$Z1 = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{z}_1(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda . \quad (9)$$

При использовании наборов СФ $X1X2Y1Z1$ полученные показатели приемников $X1$ и $X2$ следует, как и ранее, складывать для полной информации по красному каналу. Далее рассчитанные значения координат цвета переводятся из системы $M'_2 N'_2 P'_2$ в систему XYZ МКО 1931 г. по коэффициентам перехода.

После чего определяются координаты цветности в системе xu по формулам (1) и (2). Для более объективной оценки результатов следует найти цветовое различие в равноконтрастной системе. Соотношения координат цветности международной системы xu с координатами в равноконтрастной системе $u'v'$ МКО 1974 г., выбранной как наиболее точная [12], определяются следующими уравнениями [7]:

$$u' = \frac{4x}{(-2x + 12y + 3)}; \quad (10)$$

$$v' = \frac{9y}{(-2x + 12y + 3)}, \quad (11)$$

где u', v' – координаты цветности в равноконтрастной системе u', v' ; x, y – координаты цветности в линейной системе xu .

Цветовое различие Δe координат цветности определяется по выражению

$$\Delta e = \sqrt{\Delta u'^2 + \Delta v'^2}, \quad (12)$$

где $\Delta u', \Delta v'$ – разность координат теоретической и практической цветности в равноконтрастной системе $u'v'$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве исследуемых образцов были выбраны группы светофильтров (СФ) из набора цветных оптических стекол: зеленые (ЗС1, ЗС3, ЗС7, ЗС8, ЗС10, ЗС11), желто-зеленые (ЖЗС1, ЖЗС5, ЖЗС6, ЖЗС0, ЖЗС12, ЖЗС17) и желтые (ЖС10, ЖС12, ЖС16, ЖС17, ЖС18, ЖС20), так как к точности воспроизведения именно этих цветов восприимчива зрительная система человека. В каждой группе по 6 образцов ввиду ограниченности набора зеленых СФ.

По формулам (3)–(5) были рассчитаны координаты цвета 18 образцов в системах XYZ МКО 1931 г. и $M'_2N'_2P'_2$. По формулам (6)–(9) были найдены координаты цветности в системе $X_1X_2Y_1Z_1$. Далее координаты цвета систем $M'_2N'_2P'_2$ и $X_1X_2Y_1Z_1$ были переведены в систему XYZ МКО 1931 г. по коэффициентам пересчета.

Рассчитанные координаты цветности по формулам (1) и (2) в системах XYZ МКО 1931 г. и $M'_2N'_2P'_2$ отличаются на 0,0001, в то время как отличие рассчитанных координат XYZ МКО 1931 г. от теоретических, приведенных в каталоге*, составило не более 0,01 по Δx и Δy . Последнее является либо небольшим отклонением спектральных направленных коэффициентов пропускания исследуемых светофильтров от приведенных характеристик в каталоге, либо погрешностью измерений этих характеристик на *SPECOL* 210. Однако будем считать данную погрешность приемлемой ввиду ГОСТ Р 52489-2005.

* Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог /под ред. проф. Г.Т. Петровского. – М.: Дом оптики, 1990. – 228 с.

Далее по формулам (4) и (5) были найдены координаты цветности светофильтров по каждой исследуемой системе. Результаты расчета для ЖЗС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета в системе XYZ MCO 1931 г.

The results of the calculation in the XYZ CIE 1931 system

Свето- фильтры	Координаты цветности	Исследуемые светофильтры					
		ЖЗС1	ЖЗС5	ЖЗС6	ЖЗС9	ЖЗС12	ЖЗС17
Системы $M'_2N'_2P'_2$	x	0,380	0,465	0,473	0,429	0,336	0,365
	y	0,586	0,450	0,469	0,511	0,629	0,614
Система $X1X2Y1Z1$	x	0,358	0,458	0,465	0,417	0,316	0,342
	y	0,621	0,476	0,496	0,546	0,675	0,655
Разность координат	Δx	0,022	0,007	0,008	0,012	0,02	0,023
	Δy	0,035	0,026	0,027	0,035	0,046	0,041
Среднее значение	Δx	0,015					
	Δy	0,035					

Разность координат цветности систем $M'_2N'_2P'_2$ и $X1X2Y1Z1$ в среднем составила $\Delta x = 0,015$, $\Delta y = 0,035$. Для объективной оценки координаты были переведены в равноконтрастную систему по формулам (10)–(11) и найдено цветовое различие Δe , составившее в среднем 0,017 (см. табл. 3). Результаты расчета по всем группам СФ представлены в табл. 4.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчета в равноконтрастной системе $u'v'$ MCOThe results of the calculation in the equal-contrast system $u'v'$ CIE

Свето- фильтры	Координаты цветности	Исследуемые светофильтры					
		ЖЗС1	ЖЗС5	ЖЗС6	ЖЗС9	ЖЗС12	ЖЗС17
Системы $M'_2N'_2P'_2$	u'	0,164	0,249	0,246	0,208	0,136	0,152
	v'	0,569	0,542	0,550	0,556	0,573	0,573
Система $X1X2Y1Z1$	u'	0,147	0,235	0,232	0,191	0,121	0,135
	v'	0,574	0,550	0,556	0,564	0,580	0,579
Разность координат	$\Delta u'$	0,017	0,014	0,014	0,017	0,015	0,017
	$\Delta v'$	0,005	0,007	0,007	0,008	0,007	0,006
Изменение цветности	Δe	0,018	0,016	0,016	0,018	0,017	0,018
Среднее значение	Δe_{cp}	0,017					

Таблица 4

Table 4

Результаты расчета групп светофильтров

Calculation results of the of groups of filters

Группа светофильтров	Δx_{cp}	Δy_{cp}	Δe_{cp}
ЗС	0,010	0,035	0,0166
ЖЗС	0,015	0,035	0,0170
ЖС	0,009	0,021	0,0158
Усредненные значения	0,01	0,03	0,016

По результатам в табл. 4 видно, что отклонение системы $X1X2Y1Z1$ от $M'_2N'_2P'_2$ особенно заметно по Δy (в 3 раза по сравнению с Δx), что может быть связано с более узкой характеристикой $y_1(\lambda)$ относительно $m_2(\lambda)$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

По методике исследования систем цветоделения на оптико-электронной установке, описанной в источнике [13], были проведены измерения выбранных образцов 18 СФ на основе разработанной системы $X1X2Y1Z1$.

Координаты цвета, найденные по коэффициентам яркости снимков каждого приемника $X1$, $X2$, $Y1$ и $Z1$, также по коэффициентам пересчета переводились в систему XYZ МКО 1931 г., складывались показатели $X1$ и $X2$, после чего находились координаты цветности по формулам (1) и (2) и в равноконтрастной системе – по формулам (10) и (11). В качестве эталонного значения были приняты рассчитанные координаты цветности для системы $M'_2N'_2P'_2$, на основе характеристик которой и были разработаны приемники $X1X2Y1Z1$. Результаты расчета для групп желто-зеленых СФ представлены в табл. 5.

Таблица 5

Table 5

Результаты расчета для желто-зеленых СФ

Calculation results for YGG

СФ	Координаты в системе XYZ МКО 1931 г.						Координаты в $u'v'$ МКО				Δe
	Рассчитанные $M'_2N'_2P'_2$		Эксперимент $X1X2Y1Z1$		Разность		Рассчитанные $M'_2N'_2P'_2$		Эксперимент $X1X2Y1Z1$		
	x	y	x	y	Δx	Δy	u'	v'	u'	v'	
ЖЗС1	0,38	0,586	0,392	0,607	0,012	0,021	0,164	0,569	0,165	0,575	0,006
ЖЗС5	0,465	0,45	0,498	0,456	0,033	0,006	0,249	0,542	0,266	0,549	0,019
ЖЗС6	0,473	0,469	0,51	0,46	0,037	0,009	0,246	0,549	0,272	0,552	0,026
ЖЗС9	0,429	0,511	0,469	0,517	0,04	0,006	0,207	0,556	0,227	0,563	0,021
ЖЗС12	0,336	0,629	0,304	0,705	0,032	0,076	0,136	0,573	0,112	0,585	0,027
ЖЗС17	0,365	0,614	0,386	0,624	0,021	-0,01	0,151	0,573	0,159	0,578	0,009
Среднее значение					0,029	0,018					0,018

Усредненные результаты эксперимента по группам СФ представлены в табл. 6.

Таблица 6

Table 6

Результаты эксперимента групп светофильтров

The results of the experiment groups of filters

Группа свето- фильтров	$\Delta x_{\text{ср}}$	$\Delta y_{\text{ср}}$	$\Delta e_{\text{ср}}$
ЗС	0,045	0,020	0,025
ЖЗС	0,029	0,018	0,018
ЖС	0,035	0,012	0,021
Усредненные значения	0,036	0,017	0,021

Получено достаточно хорошее изменение цветности – 0,021. Значения $\Delta x_{\text{ср}}$ и $\Delta y_{\text{ср}}$ не соответствуют рассчитанным (см. табл. 4), что указывает на возможные погрешности при проведении эксперимента. Несмотря на исключение части шумов матрицы (учет «темнового кадра», применение низкочастотного фильтра), повторяемость эксперимента (анализ пяти снимков каждого образца), исключение отклонения источника света от характеристики источника типа А, полностью от погрешности избавиться невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы разработанные системы $M_2N_2P_2'$ и $X1X2Y1Z1$. При анализе источника равноэнергетического спектра E доказана согласованность обеих систем с XYZ МКО 1931 г. На основе математического моделирования были найдены координаты цвета и цветности 18 подобранных зеленых, желто-зеленых и желтых светофильтров. Средний показатель по цветовому различию в равноконтрастной системе $u'v'$ МКО 1974 г. составил 0,016. При проведении экспериментальных исследований показатель увеличился до 0,021, что указывает на неучтенные погрешности при проведении эксперимента.

Полученные результаты расчета и эксперимента показывают хорошую перспективу внедрения систем цветоделения схожих по характеристикам с колориметрической системой XYZ МКО 1931 г. в современные цифровые устройства регистрации и обработки изображений. Полученные характеристики по форме превосходят современные аналоги и позволят минимизировать потери при воспроизведении цвета [3, 14].

В дальнейшем разработанная система цветоделения $X1X2Y1Z1$ будет внедрена в цифровой колориметр [15]. Поэтому при разработке методики эксперимента на цифровом колориметре необходимо будет учесть некоторые погрешности для получения точных координат цвета, максимально соответствующих результатам математического моделирования. Так как значения Δx и Δy для групп СФ разнятся, то необходимо предусмотреть градуировку по каждому основному цвету: зеленому, синему, красному, а также, возможно, по промежуточным цветам: желтому, оранжевому и фиолетовому.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бородулин Д.В., Горбачев А.А., Краснящих А.В.* Сравнение оптических приемников на основе ПЗС и КМОП-структур // Оптика-2005: труды Четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – С. 147.
2. Преобразователи изображения на приборах с зарядовой связью / Р.Е. Быков, А.А. Манцетов, Н.Н. Степанов, Г.А. Эйссенгардт. – М., 1992. – 184 с.
3. *Lyon R., Hubel P.M.* Eyeing the camera: into the next century [Electronic resource] // The Tenth Color Imaging Conference. – Scottsdale, AZ, 2002. – P. 349–355. – URL: http://www.foveon.com/files/CIC10_Lyon_Hubel_FINAL.pdf (accessed: 28.03.2019).
4. *Гребенникова О.Ф., Тихомирова Г.В.* Основы записи и воспроизведения информации. – СПб.: СПбГУКиТ, 2002. – 712 с.
5. *Джадд Д., Вышецкий Г.* Цвет в науке и технике / пер. с англ. под ред. Л.Ф. Артюшина. – М.: Мир, 1978. – 592 с.
6. *Нейман В.И.* Цифровая обработка изображений в современном приборостроении // Приборы. – 2007. – № 2. – С. 57–63.
7. *Мешков В.В., Матвеев А.Б.* Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 430 с.
8. *Кривошеев М.И., Кустарев А.К.* Цветовые измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
9. *Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б.* О реализации оптико-электронного колориметра в колориметрической системе XYZ МКО 1931 г. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63, № 1. – С. 112–119. – DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-1-112-119.
10. *Zhbanova V.L., Nubin V.V.* A method of improving colour rendition of digital photo- and videocameras // Light & Engineering. – 2014. – Vol. 22, N 2. – P. 84–89.
11. *Ландсберг Г.С.* Оптика. – 6-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.
12. *Иванов В.Е., Широких Т.В.* Сравнение равноконтрастных колориметрических систем // Светотехника. – 2014. – № 6. – С. 44–47.
13. *Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б.* Экспериментальное исследование системы цветоделения матричного фотоприемника // Оптический журнал. – 2019. – № 3. – С. 61–67.
14. *Новаковский С.В.* Цвет на экране телевизора. Основы телевизионной колориметрии. – М.: Радио и связь, 1997. – 168 с.
15. *Парвулюсов Ю.Б., Жбанова В.Л.* Колориметр для оценки насыщенных цветов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 5. – С. 122–126.

Жбанова Вера Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры оптико-электронных систем филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске. Основное направление – колориметрия и оптико-электронные приборы и системы. Имеет более 40 публикаций, в том числе монографию. E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

Zhbanova Vera Leonidovna, PhD (Eng.), an associate professor at the department of optical and electronic systems, Smolensk Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute". The main field of her research includes colorimetry and optoelectronic devices and systems. She is the author of more than 40 publications including 1 monograph. E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-167-180

A color separation system with characteristics close to CIEXYZ 1931*

V.L. ZHBANOVA

*Smolensk Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
1, Energeticheskiy Prospekt, Smolensk, 214013, Russian Federation**vera-zhbanova@yandex.ru***Abstract**

The paper presents the results of research in the X1X2Y1Z1 color separation system and its color space M'2N'2P'2. The analysis of these two systems was carried out for compliance with the XYZ MKO 1931 colorimetric system. The color separation system was developed to match the registration systems for color image processing. The X1X2Y1Z1 receivers are based on sets of colored optical glasses to comply with the characteristic of the Sony matrix. The curves were chosen in such a way that their shape and peaks coincided as much as possible with the M'2N'2P'2 color space. The curves obtained were a little different in shape, but the best option possible was adopted. The M'2N'2P'2 color space has characteristics similar to the XYZ CIE of 1931, while it is independent and even has an improved color triangle with a minimal inclusion of unreal colors. The transition coefficients from the developed systems to the XYZ system, which are necessary for a better assessment of chromaticity coordinates and a correct transition to other colorimetric systems including equal contrast, are given. A description of the methodology for conducting mathematical modeling to find color coordinates and color samples in the developed color space M'2N'2P'2 and based on its color separation system X1X2Y1Z1 is presented. For an objective assessment of the quality of the developed systems, a change in the chromaticity of green, yellow-green and yellow light filters was found. The values of the experimentally found chromaticity coordinates of the selected light filters on an optical-electronic setup are given. An analysis of the experimental and calculated values was carried out. In general, the system showed a satisfactory result, which proved its efficiency. Based on the analysis, conclusions were made on further work with the color separation system X1X2Y1Z1.

Keywords: color separation system, colorimeter, light filters, receivers, matrix, colorimetric system, equal contrast system, color difference

REFERENCES

1. Borodulin D.V., Gorbachev A.A., Krasnyashchikh A.V. [Comparison of optical receivers based on CCD and CMOS structures]. *Optika-2005: trudy Chetvertoi mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [Optics-2005. Proceedings of the Fourth International Conference of Young Scientists and Specialists]. St. Petersburg, 2005p. 147. (In Russian).
2. Bykov R.E., Mantsvetov A.A., Stepanov N.N., Eissengardt G.A. *Preobrazovateli izobrazheniya na priborakh s zaryadovoi svyaz'yu* [Image transducers on charge-coupled devices]. Moscow, 1992. 184 p.
3. Lyon R., Hubel P.M. Eyeing the camera: into the next century. *The Tenth Color Imaging Conference*, Scottsdale, AZ, 2002, pp. 349–355. Available at: http://www.foveon.com/files/CIC10_Lyon_Hubel_FINAL.pdf (accessed 28.03.2019).
4. Grebennikova O.F., Tikhomirova G.V. *Osnovy zapisi i vosproizvedeniya informatsii* [Basics of recording and playback information]. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Film and Television, 2002. 712 p.

* Received 12 September 2018.

The reported study was funded by RFBR according to research project № 18-37-00176

5. Judd D.B. *Color in business, science and industry*. New York, Wiley, 1975 (Russ. ed.: Dzhadd D., Vyshetskii G. *Tsvet v nauke i tekhnike*. Moscow, Mir Publ., 1978. 592 p.).
6. Neiman V.I. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v sovremennom priborostroenii [Digital image processing in modern instrument making]. *Pribory*, 2007, no. 2, pp. 57–63. (In Russian).
7. Meshkov V.V., Matveev A.B. *Osnovy svetotekhniki*. Ch. 2. Fiziologicheskaya optika i kolorimetriya [Basics of lighting. Pt. 2. Physiological optics and colorimetry]. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 430 p.
8. Krivosheev M.I., Kustarev A.K. *Tsvetovye izmereniya* [Color measurements]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 240 p.
9. Zhanova V.L., Parvulusov Yu.B. O realizatsii optiko-elektronnogo kolorimetra v kolorimetricheskoi sisteme XYZ MKO 1931 g. [On the implementation of the optic-electronic colorimeter in the CIE XYZ 1931 colorimetric system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka – Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2019, vol. 63, no. (1), pp. 112–119. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-1-112-119.
10. Zhanova V.L., Nubin V.V. A method of improving colour rendition of digital photo- and videocameras. *Light & Engineering*, 2014, vol. 22, no. 2, pp. 84–89.
11. Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 848 p.
12. Ivanov V.E., Shirokikh T.V. Sravnenie ravnokonstrastnykh kolorimetricheskikh sistem [Comparison of equal-contrast colorimetric systems]. *Svetotekhnika – Light & Engineering*, Moscow, 2014, no. 6, pp. 44–47. (In Russian).
13. Zhanova V.L., Parvulyusov Yu.B. Eksperimental'noe issledovanie sistemy tsvetodeleniya matrichnogo fotopriemnika [Experimental study of the color separation system of a matrix photodetector]. *Opticheskii zhurnal – Journal of Optical Technology*, 2019, no. 3, pp. 61–67. (In Russian).
14. Novakovskii S.V. *Tsvet na ekrane televizora. Osnovy televizionnoi kolorimetrii* [Color on the TV screen. The basics of television colorimetry]. Moscow, Radio I svyaz' Publ., 1997. 168 p.
15. Parvulusov Yu.B., Zhanova V.L. Kolorimetr dlya otsenki nasyshchennykh tsvetov [Principles of instrumental color measurement and further measurements assessment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka – Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2017, no. 5, pp. 122–126.

Для цитирования:

Жбанова В.Л. Система цветоделения с характеристиками, близкими к XYZ MKO 1931 г. // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 167–180. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-167-180.

For citation:

Zhanova V.L. Sistema tsvetodeleniya s kharakteristikami, blizkimi k XYZ MKO 1931 g. [A color separation system with characteristics close to CIEXYZ 1931]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 167–180. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-167-180.

ЭНЕРГЕТИКА

ENERGETICS

УДК 51.74

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-181-196

Марковская последовательность переходящих запасов топлива*

Е.В. ГУБИЙ^а, В.И. ЗОРКАЛЬЦЕВ^б

664033, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики СО РАН

^аegubiy@gmail.com ^бzork@isem.irk.ru

Рассматривается модель анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов с энергетических плантаций. В модели учитываются три случайных фактора: годовая потребность, годовой объем производства и переходящие из года в год запасы топлива. Анализ надежности топливоснабжения осуществляется на основе имитационного моделирования функционирования системы топливоснабжения в течение года с использованием метода статистических испытаний. Случайные величины потребности и производства биотоплива при имитации функционирования системы топливоснабжения формируются непосредственно методом Монте-Карло.

Случайная величина переходящих запасов топлива в модели анализа надежности топливоснабжения вырабатывается по специальному алгоритму в самом процессе многократной имитации функционирования системы топливоснабжения. В данной статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований этого алгоритма. Установлено, что алгоритм формирования случайной величины переходящих запасов топлива вырабатывает марковскую однородную последовательность. Определены достаточные условия единственности стационарного состояния. На основе экспериментальных расчетов оценено количество итераций для достижения стационарного состояния и количество итераций, достаточных для достоверной оценки показателей надежности топливоснабжения и математического ожидания затрат на топливоснабжение при разном составе средств резервирования.

Ключевые слова: энергетические плантации, топливоснабжение отдаленных населенных пунктов, запасы топлива, метод Монте-Карло, надежность энергоснабжения, резервы мощности, случайный процесс, стационарность, эргодичность

ВВЕДЕНИЕ

Анализ надежности топливоснабжения отдаленных от транспортных магистралей населенных пунктов на основе биомассы, выращиваемой на специальных энергетических плантациях, требует специальных исследований, по-

* Статья получена 12 октября 2018 г.

Исследование выполнено в рамках научного проекта III.17.4.4 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310436-7 и при финансовой поддержке РФФИ и правительства Иркутской области (грант № 17-410-380003).

тому что энергоснабжение осуществляется при существенных воздействиях случайных факторов в производстве и потреблении топлива. Ущерб в случае возникновения дефицита топлива для таких пунктов гораздо выше, чем на близких к транспортным магистралям территориях.

Кроме случайных отклонений, в производстве и потреблении следует учитывать еще и третий случайный фактор – величину переходящих запасов топлива. Если в какой-то год потребление энергии оказывается ниже среднего значения и (или) объем произведенного топлива оказывается выше среднего ожидаемого значения, то производство топлива в данном году может превысить потребность. Избыток топлива может быть сохранен для следующего года. Эти запасы используются при возникновении обратных ситуаций, когда потребление превышает производство. Возможна ситуация, когда эти запасы исчерпаны. Тогда образуется дефицит, который может покрываться из более дорогих по стоимости поставляемого топлива источников. Отметим, что за год в данной статье принимается период от начала одного отопительного периода до начала следующего.

В данной статье рассматривается алгоритм формирования переходящих запасов топлива, который можно интерпретировать как имитацию многолетнего процесса изменений запасов в результате случайных реализаций объемов производства и потребности в каждом году. Показано, что этот алгоритм вырабатывает однородную марковскую последовательность запасов. Как известно, однородная марковская последовательность сходится с ростом числа итераций к стационарному состоянию, при котором плотности вероятности случайной величины в начале и в конце очередной итерации неизменны. Выявлено условие, при котором стационарное состояние единственно. Показано, что рассматриваемый имитационный процесс удовлетворяет этому условию. Экспериментально оценено количество итераций, достаточных для того, чтобы считать, что рассматриваемый процесс перешел в стационарное состояние, и количество итераций в стационарном состоянии, при котором в результате усреднений по итерациям будут получены достоверные оценки показателей надежности и математического ожидания суммы затрат на топливоснабжение с энергетических плантаций и ущерба от дефицита. Представлены результаты исследования на примере теплоснабжения биотопливом с энергетических плантаций отдаленного населенного пункта в природно-климатических и ценовых условиях побережья озера Байкал.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для населенных пунктов, отдаленных от крупных транспортных магистралей, нужны источники котельно-печного топлива, не требующие дорогостоящей транспортировки. Целесообразно рассмотреть возможности создания специальных энергетических плантаций, активно используемых в некоторых странах, в том числе в Финляндии и Швеции [1, 2]. Особенное значение такой источник топливоснабжения имеет для районов с повышенными экологическими требованиями, к которым относится побережье озера Байкал.

При исследовании возможностей использования энергетических плантаций для топливоснабжения отдаленных населенных пунктов особое значение

имеет проблема надежности топливоснабжения, поскольку в этом случае оно осуществляется в условиях сильного действия случайных факторов. При этом ущербы из-за необходимости экстренных дополнительных поставок топлива в случае возникновения дефицита оказываются гораздо выше, чем на близких к транспортным магистралям территориях.

Для анализа надежности снабжения котельно-печным топливом отдаленных населенных пунктов с энергетических плантаций и для выбора оптимального состава средств обеспечения надежности разработана и реализована математическая модель, основанная на использовании метода статистических испытаний [3]. В модели учтены три случайные величины: годовая потребность в топливе, годовой объем производства топлива и переходящие от одного отопительного сезона к другому запасы топлива. Если первые две случайные величины реализуются в модели непосредственно методом Монте-Карло, то третья случайная величина реализуется итеративно в процессе самой многократной имитации функционирования системы топливоснабжения. Исследованию и обоснованию этого итеративного алгоритма и анализу взаимодействия всех трех случайных параметров посвящена настоящая статья.

1.1. СЛУЧАЙНАЯ ВЕЛИЧИНА ПОТРЕБНОСТИ В ТОПЛИВЕ

Потребность в котельно-печном топливе населенных пунктов, особенно для сельских населенных пунктов в условиях Сибири, во многом связана с задачами отопления помещений. Поэтому случайные отклонения потребности в топливе вызваны преимущественно отклонениями продолжительностей отопительных периодов и среднезимних температур. На основе накопленных за многие десятилетия данных о значениях среднесуточных температур наружного воздуха [4] можно определять возможные отклонения потребности в топливе на отопление. Изучением проблемы надежности теплоснабжения и связанных с ней исследований многолетних колебаний температур воздуха свой вклад внесли М.А. Великанов, В.И. Зоркальцев, Ю.А. Мазур, А.С. Некрасов, Л.С. Хрилев и др. [5–8].

Пусть $\tau = 1, \dots, T$ – номера прошлых отопительных периодов с имеющимися по ним данными о среднесуточных температурах. Обозначим N_{τ}^j продолжительность в днях отопительного периода τ . В представленных далее расчетах считается, что отопительный период наступает после того, как в течение пяти суток подряд среднесуточная температура воздуха была ниже $+8^{\circ}\text{C}$. Заканчивается отопительный период после того, как температура воздуха становится выше $+8^{\circ}\text{C}$ в течение пяти суток подряд.

Для описания возможных колебаний расхода топлива на теплоснабжение будем использовать расчетный показатель отклонения потребности в топливе на отопление одного из отопительных периодов от среднеожидаемого уровня

$$b_{\tau} = B_{\tau} / \bar{B}, \quad \tau = 1, \dots, T, \quad (1)$$

где B_τ – показатель интегральной разности температур за отопительный период τ , который рассчитывается по формуле

$$B_\tau = \sum_{\chi=1}^{N_\tau} (\hat{t} - t_{\tau\chi}), \quad \tau = 1, \dots, T, \quad (2)$$

где \bar{B} – средняя за все рассматриваемые отопительные периоды интегральная разность температур внутри и вне здания:

$$\bar{B} = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T B_\tau. \quad (3)$$

Здесь \hat{t} – нормативное значение температуры внутри здания; $t_{\tau\chi}$ – средняя температура наружного воздуха в день χ отопительного периода τ .

Если отопительный период τ был относительно теплым ($B_\tau < \bar{B}$), то величина b_τ меньше единицы. В этом случае значение $(1 - b_\tau)$ будет характеризовать относительное (выраженное в процентах от среднеожидаемой потребности) снижение потребности в топливе на отопление. Если отопительный период был холодней, чем средний ($B_\tau > \bar{B}$), то величина b_τ больше единицы. Значение $(b_\tau - 1)$ в этом случае будет характеризовать относительное возрастание потребности в топливе. Использование относительной величины b_τ позволяет оценить вероятности отклонений потребности в топливе.

На основе значений относительных отклонений расхода топлива на отопление за весь многолетний период можно рассчитать следующие показатели:

- максимальное снижение потребности в самые теплые в прошлом отопительные периоды

$$\Delta_{\min} = \min \{ (b_\tau - 1); \tau = 1, \dots, T \}; \quad (4)$$

- максимальное возрастание потребности в топливе на отопление в самые холодные в прошлом отопительные периоды

$$\Delta_{\max} = \max \{ b_\tau - 1; \tau = 1, \dots, T \}; \quad (5)$$

- диапазон вариаций отклонений потребности в топливе на отопление

$$\Delta = \Delta_{\max} - \Delta_{\min}. \quad (6)$$

Эти три показателя представлены в первых трех столбцах таблицы. В четвертом столбце представлены значения средних отклонений по абсолютной величине потребности в топливе на отопление за рассматриваемый многолетний период:

$$I = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T |b_\tau - 1|. \quad (7)$$

Показатели, характеризующие колебания потребности в топливе на отопление по некоторым пунктам метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока

Indicators characterizing fluctuations of the need for heating fuel for some items of meteorological observations of the Urals, Siberia and the Far East

Пункт метеонаблюдения	Максимальные отклонения от среднемноголетнего		Диапазон колебаний потребности в топливе	Интенсивность колебаний
	в сторону уменьшения	в сторону увеличения		
Чита	-0,308	0,152	0,461	0,048
Иркутск	-0,453	0,162	0,615	0,061
Томск	-0,404	0,185	0,590	0,068
Красноярск	-0,276	0,265	0,541	0,063
Хабаровск	-0,248	0,102	0,350	0,049
Екатеринбург	-0,353	0,185	0,539	0,074
Барнаул	-0,321	0,321	0,643	0,063
Владивосток	-0,341	0,179	0,520	0,055

В таблице пункты метеонаблюдений расположены по мере убывания средней интегральной разности температур за отопительный период. Здесь представлены показатели, рассчитанные по формулам (4)–(7) на основе данных наблюдений температур за 1910–2010 гг. в пунктах метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока. Из этих данных видно, что потребности в топливе на отопление могут изменяться до 64 % (в Барнауле). То есть расхождения в потребностях в зависимости от того, насколько теплая или холодная будет зима, могут достигать половины и более от средней годовой потребности. Ежегодные средние абсолютные отклонения потребностей от средней величины также существенны, показатель интенсивности колебаний составляет до 7,4 % (в Екатеринбурге) от математического ожидания потребности в топливе [9].

Отметим, что в нижней части таблицы (пункты метеонаблюдений с более теплым климатом) значения показателей диапазона и интенсивности колебаний потребности в топливе существенно выше. Это означает, что при переходах от более холодных к более теплым районам роль случайного фактора в потреблении топлива на отопление возрастает. Ранее эта закономерность была отмечена при сопоставлении диапазонов и интенсивности отклонений потребности в топливе на отопление по экономическим районам СССР [4]. Исключением является Хабаровск, что, вероятно, происходит под влиянием морского муссонного климата.

В модели анализа надежности топливоснабжения [10, 11] для генерации случайной величины производства топлива используется датчик случайных чисел. Этот датчик выбирает одно из значений за прошлые периоды наблюдений относительных отклонений интегральной разности температур b_τ , рассчитываемых по формуле (1), затем рассчитывается случайная величина потребности в топливе

$$Q = b \cdot \bar{Q}, \quad (8)$$

где b – значение относительного отклонения интегральной разности температур, случайно выбранного из набора b_τ , $\tau = 1, \dots, T$; \bar{Q} – расчетное математическое ожидание потребности в топливе.

Границы интервала возможных значений $[Q^1, Q^2]$ случайной величины потребности в топливе определяются по следующим правилам:

$$Q^1 = \min_{\tau} b_{\tau} \bar{Q}; \quad (9)$$

$$Q^2 = \max_{\tau} b_{\tau} \bar{Q}. \quad (10)$$

Итак, в рамках реализованного в настоящее время варианта модели анализа надежности используются случайно выбранные объемы потребностей из дискретного набора с вероятностью реализации любого значения $\frac{1}{T}$.

1.2. СЛУЧАЙНАЯ ВЕЛИЧИНА ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВА

Значительные отклонения в производстве топлива на энергетических плантациях могут возникать из-за действия природных, биологических и антропогенных факторов. Для оценок возможных отклонений в производстве биотоплива с энергетических плантаций и вероятности их реализации пока нет необходимых данных. Поэтому используется усеченный нормальный закон с экспертно оцениваемым и варьируемым диапазоном возможных значений и дисперсией.

При анализе надежности и эффективности конкретного состава средств резервирования заданными считаются математическое ожидание производства топлива \bar{R} , величина среднеквадратического отклонения σ и коэффициенты δ^1 и δ^2 , определяющие интервал возможных значений $[R^1, R^2]$ случайной величины производства топлива. Границы этих интервалов задаются по следующим правилам:

$$R^1 = \delta^1 \bar{R}; \quad (11)$$

$$R^2 = \delta^2 \bar{R}. \quad (12)$$

Итак, случайная величина производства топлива выбирается методом Монте-Карло из интервала $[R^1, R^2]$ на основе заданной функции плотности вероятности $P(R)$, имеющей положительные значения на всем указанном интервале и нулевые – вне интервала:

$$\int_{R=R^1}^{R^2} P(R) dR = 1; \quad (13)$$

$$P(R) > 0, R \in [R^1, R^2]; \quad (14)$$

$$P(R) = 0, R \notin [R^1, R^2]. \quad (15)$$

1.3. СЛУЧАЙНАЯ ВЕЛИЧИНА ПЕРЕХОДЯЩИХ ЗАПАСОВ ТОПЛИВА

Вероятности реализации случайной величины переходящих запасов топлива априори оценить невозможно, поскольку они зависят не только от вероятностей реализации производства и потребностей в прошедшем году, но и от перешедших с позапрошлого года запасов и, соответственно, их вероятностей. Представляется вполне естественным ввести предположение, что закон вероятности переходящих запасов в начале текущего и предыдущего годов один и тот же. Возникают следующие вопросы: существует ли такой закон вероятности запасов? единственен ли он? Как при получении положительных ответов на предыдущие вопросы организовать случайную реализацию запасов по этому закону вероятности? Поиск и обоснование ответов на эти вопросы – основная задача настоящей статьи.

2. АЛГОРИТМ ИЗМЕНЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕХОДЯЩИХ ЗАПАСОВ ТОПЛИВА

Обозначим $v = 0, 1, \dots, V$ номера итераций по имитации функционирования системы топливоснабжения в течение года. Пусть s_v – объем переходящих запасов топлива на начало имитируемого отопительного периода v ; R_v, Q_v – реализации случайных величин производства и потребления топлива. Разницу этих величин обозначим

$$L_v = R_v - Q_v. \quad (16)$$

Расчет объема переходящих запасов топлива на начало следующей итерации можно представить в виде следующего правила:

$$s_{v+1} = \min \{ (L_v + s_v)_+; z \}. \quad (17)$$

Здесь z – заданный объем складов под переходящие запасы. Используется функция отрицательной «срезки» от вещественной переменной x :

$$x_+ = \max \{ 0, x \}. \quad (18)$$

Плотность вероятности реализации случайной величины $L = R - Q$.

Эта величина является разностью непрерывной с заданной плотностью вероятности (13) случайной величины R и дискретной случайной величины Q . Пусть $Q_i, i = 1, \dots, T$, – упорядоченный по возрастанию набор значений $b_\tau \bar{Q}$, $i = \tau, \dots, T$:

$$Q_1 = Q^1, Q_T = Q^2; \quad (19)$$

$$Q_i \leq Q_{i+1}, i = 1, \dots, T-1. \quad (20)$$

Поскольку считаем, что вероятности реализации потребностей Q_i одинаковые, то плотность вероятности L определяется исходя из плотности вероятности R по формуле

$$\tilde{P}(L) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T P(L + Q_i). \quad (21)$$

Случайная величина L может иметь положительную плотность вероятности только на интервале $[L^1, L^2]$, где

$$L^1 = R^1 - Q^2; \quad (22)$$

$$L^2 = R^2 - Q^1. \quad (23)$$

Далее считаем, что выполняется неравенство

$$R^2 - R^1 \geq \max(Q_{i+1} - Q_i), \quad i = 1, \dots, T-1. \quad (24)$$

То есть величины Q_i расположены достаточно плотно. Тогда согласно (13) и (19)–(21) случайная величина L будет иметь положительную плотность вероятности на всем интервале $[L^1, L^2]$:

$$\int_{L=L^1}^{L^2} \tilde{P}(L) dL = 1; \quad (25)$$

$$\tilde{P}(L) > 0, \quad L \in [L^1, L^2]; \quad (26)$$

$$\tilde{P}(L) = 0, \quad L \notin [L^1, L^2]. \quad (27)$$

Функция вероятности изменения запасов. На основе выражения (25) введем функцию плотности вероятности гипотетически возможных изменений запасов от величины $s_v \in [0, z]$ до величины $s_{v+1} \in [s_v + L^1, s_v + L^2]$

$$\tilde{\varphi}(s_{v+1}, s_v) = \tilde{P}(s_{v+1} - s_v). \quad (28)$$

Здесь используется термин «гипотетически возможные» из-за того, что величина s_{v+1} в указанном интервале может иметь отрицательное значение при $s_v + L^1 < 0$, значение больше емкости складов при $s_v + L^2 > z$. Функция $\tilde{\varphi}$ является предварительной конструкцией для приводимого далее определения функции плотности вероятности (имеющей значение вероятности в крайних точках) перехода от запасов s_v к запасам s_{v+1} на интервале $[0, z]$.

На основе выражений (28) и (17) функции вероятностей перехода от запасов $s_v \in [0, z]$ к запасу $s_{v+1} \in [0, z]$ определяются следующими условиями:

$$\varphi(s_{v+1}, s_v) = \tilde{\varphi}(s_{v+1}, s_v), \quad \text{если } 0 < s_v < z; \quad (29)$$

$$\varphi(0, s_v) = \int_{L_1+s_v}^0 \varphi(x, s_v) dx, \quad \text{если } L^1 + s_v \leq 0; \quad (30)$$

$$\varphi(z, s_v) = \int_z^{L_2+s_v} \tilde{\varphi}(x, s_v) dx, \quad \text{если } L^2 + s_v \geq z. \quad (31)$$

Отметим, что в случае (29) значение функции φ является плотностью вероятности; в случаях (30) и (31), если они реализуются, значение φ будет

вероятностью. Исключениями являются теоретически возможные ситуации $L^1 + s_v = 0$ и $L^2 + s_v = z$, когда значения $\varphi(0, s_v)$ и $\varphi(z, s_v)$ будут плотностями вероятности.

Однородная марковская последовательность. При заданном s_v из $[0, z]$ плотность вероятности (вероятность в крайних точках) реализации значения s_{v+1} из $[0, z]$ определяется только функцией φ . Следовательно, при любом положительном значении s_1 из $[0, z]$, вырабатываемом по правилу (2), последовательность запасов $s_v, v=1, 2, \dots$ будет марковской. Поскольку функция φ не изменяется по итерациям, то это будет однородная марковская последовательность.

Далее будем обозначать $B(s)$ одну из функций плотности вероятности величины запасов $s \in [0, z]$, обладающую следующими свойствами:

$$\int_0^z B(s) ds = 1, \quad B(s) \geq 0, \quad s \in [0, z], \quad B(s) = 0, \quad s \notin [0, z]. \quad (32)$$

Конкретные функции B из этого класса будем выделять с помощью индексов и других символов.

Пусть B_v – некоторая функция плотности вероятности запасов на итерации v . После итерации v функция плотности вероятности B_{v+1} будет иметь значение

$$B_{v+1}(s_{v+1}) = \int_0^z \varphi(s_{v+1}, s_v) B(s_v) ds_v, \quad s_{v+1} \in [0, z]. \quad (33)$$

Этот переход от функции B_v к B_{v+1} представим как отображение ψ :

$$B_{v+1} = \psi(B_v). \quad (34)$$

Как известно, однородная марковская последовательность случайных величин обладает свойством сходимости к стационарным (или финитным) состояниям [11, 12] при любом начальном распределении случайной величины.

2.1. СТАЦИОНАРНОЕ СОСТОЯНИЕ

Существование стационарного состояния однородной марковской последовательности в нашем случае означает, что имеется функция \bar{B} из класса (32), при которой

$$\bar{B} = \psi(\bar{B}). \quad (35)$$

При этом важно убедиться в единственности стационарного состояния. У марковской однородной последовательности может быть несколько стационарных состояний. В зависимости от того, на основе каких из этих возможных стационарных состояний будут формироваться запасы, при статистических испытаниях могут получиться существенно разные результаты расчетов на модели анализа надежности топливоснабжения [12].

Отметим, что при имитации функционирования системы топливоснабжения в течение года рассчитывается ряд показателей, не рассматриваемых в настоящей статье. В том числе определяются приведенные затраты на функционирование системы, зависящие от реализации величин Q_v , R_v , s_v и объем возможного дефицита топлива (превышение, если оно имеет место, потребности Q_v над располагаемыми ресурсами $R_v + s_v$). После обработки результатов по всем итерациям $v=1, \dots, V$ определяются обобщающие характеристики надежности и эффективности топливоснабжения, в том числе оценки математического ожидания дефицита и ущерба от него, математическое ожидание затрат.

На основе расчетов на модели анализа надежности топливоснабжения осуществляется выбор оптимального состава средств резервирования (резерва мощности в производстве, который определяется как разница между математическими ожиданиями производства и потребности в топливе, и емкости складов). Результаты всей этих расчетов существенно зависят от того, какая вероятность реализации запасов используется, поскольку переходящие запасы топлива могут достигать величины полугодовых и более объемов потребности в топливе.

2.2. ДОСТАТОЧНОЕ УСЛОВИЕ ЕДИНСТВЕННОСТИ СТАЦИОНАРНОГО СОСТОЯНИЯ

Докажем, что при выполнении условия (24) стационарное состояние случайной величины запасов единственное.

Поскольку $R^1 < R^2$, $Q^1 < Q^2$, то согласно (22) и (23) $L^1 < L^2$. Возможны три случая.

Первый случай

Выполнение неравенства

$$L^1 < L^2 \leq 0 \quad (36)$$

согласно (11)–(13) означает, что уровень запасов ни на одной итерации не будет расти. Он может только сокращаться и в стационарном состоянии окажется на одном нулевом уровне.

Второй случай

Если

$$0 \leq L^1 < L^2, \quad (37)$$

то согласно (11), (12) и (14) уровень запасов ни на одной итерации не будет сокращаться. Он может только расти и в стационарном состоянии примет единственное значение, равное z .

Третий случай, наиболее типичный при реализации модели

$$L^1 < 0 < L^2. \quad (38)$$

В этом случае уровень запасов $s_v \in [0, z]$ может с положительной вероятностью сокращаться (если $s_v > 0$) и возрастать (если $s_v < z$). При этом в любой

точке интервала возможных сокращений $[\max\{0, L^1 + s_v\}, s_v]$ и в любой точке интервала возможных возрастаний запасов $[s_v, \max\{z, L^2 + s_v\}]$ плотность вероятности положительна. Это следует из выражений (24)–(31). Отсюда получаем, что из любой точки $s_v \in [0, z]$ за конечное число итераций можно попасть в любую точку из интервала $[0, z]$ с положительной плотностью вероятности. Это является достаточным условием для того, чтобы рассматриваемая здесь однородная марковская последовательность имела только единственное стационарное состояние [13, 14], для которого плотность вероятности реализации случайной величины запасов s из любой точки интервала $[0, z]$ положительная:

$$\bar{B}(s) > 0, \quad s \in [0, z]. \quad (39)$$

2.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ИТЕРАЦИЙ

Для того чтобы можно было сказать, что получаемые оценки не зависят от выбора начального уровня запасов, необходимо использовать такое число итераций, которое бы приводило к значению плотности вероятностей, близкой к финитной.

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчета на модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций [15] двух показателей рассматриваемой однородной марковской последовательности – среднеарифметического значения уровня запасов и стандартного отклонения от среднеарифметического значения. Здесь приведены три разные случайные реализации процесса с использованием разных начальных значений запасов. Согласно рис. 1 уже после 6000 итераций среднеарифметическое значение уровней запасов меняется не более чем на 2 %. Стандартные отклонения меняются менее чем на 2 % после 4000 итераций. На основе этих расчетов можно считать, что 6000 итераций вполне достаточно, чтобы считать, что итерационный процесс изменения запасов при любом начальном уровне запасов приходит в состояние, которое можно считать близким к стационарному. Имеющиеся теоретические оценки [3] и результаты экспериментальных расчетов показывают, что для получения устойчивых однозначных оценок показателей надежности, математического ожидания затрат на функционирование системы топливоснабжения и математического ожидания ущербов от дефицита вполне достаточно 65 000 итераций.

Представленные здесь и ниже результаты расчетов осуществлены на модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций отдаленных населенных пунктов применительно к условиям прибрежных районов озера Байкал [11]. Рассматривался поселок со среднегодовой потребностью в топливе 8000 тонн условного топлива (т у.т.), что соответствует примерной численности населения в 6000 человек. Рассмотрены данные метеонаблюдений за 100 прошлых зим (с 1910 по 2010 г.). Максимальное расхождение $Q_{i+1} - Q_i$ составило 1032 т у.т. Разница между максимальным и минимальным значением объема производства топлива $R^2 - R^1$ составила 7986 т у.т. То есть условие (24) выполняется.



Рис. 1. Изменение по итерациям среднеарифметического значения для трех реализаций случайного процесса изменения запасов многолетнего регулирования

Fig. 1. Change by iterations of the arithmetic mean value for three implementations of the random process of changing stocks of long-term regulation



Рис. 2. Изменение по итерациям среднеквадратического отклонения от среднеарифметического значения для трех реализаций случайного процесса изменения запасов многолетнего регулирования

Fig. 2. Change by iterations of the standard deviation from the arithmetic mean value for three implementations of the random process of changing the reserves of multi-year regulation

3. ФУНКЦИЯ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ЗАПАСОВ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО СОСТОЯНИЯ

На рис. 3 представлена гистограмма распределения запасов топлива многолетнего регулирования для одного из вариантов расчетов на модели анализа надежности топливоснабжения. Максимальный запас топлива равен емкости складов и составляет 3811 т у.т. Весь интервал распределения запасов разделен на 10 равных подынтервалов. Значения по оси абсцисс соответствуют правым границам подынтервалов. Из рис. 3 видно, что повышенные вероятности запасов наблюдаются в первом и последнем подынтервалах. Повышенная вероятность запасов в первом подынтервале объясняется повышенной вероятностью нулевых уровней запасов согласно выражению (30), повышенная вероятность запасов в последнем подынтервале – повышенным уровнем вероятности запасов в объеме емкости складов z согласно выражению (31). Центральная часть гистограммы достаточно однородна, имеет унимодальный характер.

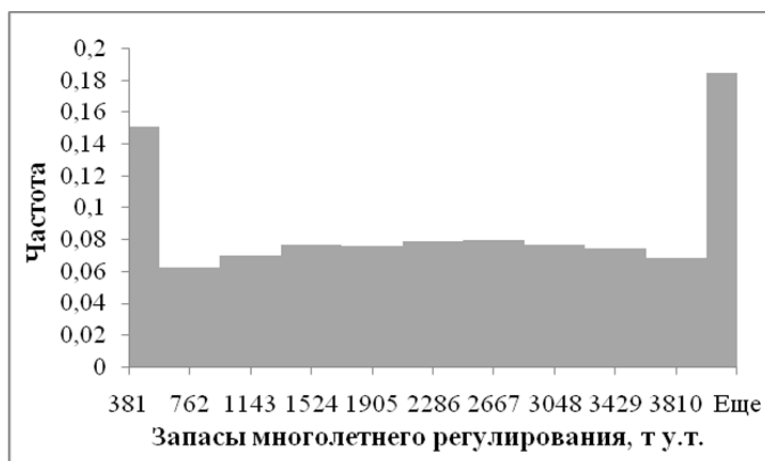


Рис. 3. Гистограмма распределения запасов топлива многолетнего регулирования

Fig. 3. The histogram of the distribution of fuel reserves of long-term regulation

Следует отметить, что при одних и тех же вероятностях потребности и производства топлива после расчетов на модели распределение вероятностей разных уровней запасов топлива многолетнего регулирования может изменяться в зависимости от рассматриваемых значений резерва мощности и емкости складов z .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в модели анализа надежности топливоснабжения отдаленного населенного пункта с энергетических плантаций [11] вырабатываемая последовательность переходящих запасов топлива является марковской однородной. Выявлено легко проверяемое по исходным данным модели достаточное условие (24) единственности стационарности состояния случайной

последовательности переходящих запасов топлива. На основе экспериментальных многократных расчетов оценено количество итераций, достаточных для получения однозначных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Potential land availability for energy crops production in Europe / E. Krasuska, C. Cado-miga, J.L. Tenorio, G. Testa, D. Scordia // *Biofuels Bioproducts and Biorefining*. – 2010. – Vol. 4. – P. 658–673.
2. Energy analysis of poplar production for bioenergy in Sweden / M. Nordborg, G. Berndes, I. Dimitriou, A. Henriksson, B. Mola-Yudego // *Biomass and Bioenergy*. – 2018. – Vol. 112. – P. 110–120.
3. *Driels M.R., Shin Y.S.* Determining the number of iterations for Monte Carlo simulations of weapon effectiveness. – Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2004. – 31 p.
4. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ): база данных [Электронный ресурс]. – № 2014620942. – URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения 4.10.2018).
5. Великанов М.А., Некрасов А.С., Резниковский А.Ш. Оценка асинхронности многолетних колебаний расхода топлива под действием геофизических факторов // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1988. – № 2. – С. 151–157.
6. Зоркальцев В.И. Многолетние колебания температур и проблемы надежности топливоснабжения. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – 84 с.
7. Мазур Ю.А. Проблемы маневренности в развитии энергетики. – М.: Наука, 1986. – 94 с.
8. Хрилев Л.С. О влиянии климатического фактора на перспективную структуру топливно-энергетического баланса // *Теплоэнергетика*. – 1960. – № 2. – С. 16–20.
9. Gubiy E.V., Zorkaltsev V.I., Khazheev I.I. Analysis long-term of variation of air temperature for the purpose of energy reliability // International conference “Advanced Mathematics, Computations and Applications – 2014”: abstracts. – Novosibirsk, 2014. – P. 56–57.
10. Губий Е.В., Зоркальцев В.И. Анализ надежности топливоснабжения населенных пунктов биотопливом с энергетических плантаций // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. – Иркутск, 2014. – Вып. 64: Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы (Иркутск, 10–15 июля 2013 г.). – С. 267–274.
11. Губий Е.В., Зоркальцев В.И. Эффективность энергетических плантаций. – Новосибирск: Наука, 2018. – 96 с.
12. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1971. – 408 с.
13. Гихман И.И., Скороход А.В. Теория случайных процессов. Т. 1. – М.: Наука, 1971. – 666 с.
14. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 528 с.
15. Губий Е.В. Математическая модель анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов биомассой с энергетических плантаций // *Вестник ИрГТУ*. – 2018. – Т. 22, № 7. – С. 102–113.

Губий Елена Валерьевна, старший инженер отдела прикладной математики Института систем энергетики СО РАН. Основное направление научных исследований – эффективность и надежность использования возобновляемых источников энергии. Имеет более 10 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: egubiy@gmail.com

Зоркальцев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов математического моделирования и оптимизации в энергетике отдела прикладной математики Института систем энергетики СО РАН. Основное направление научных исследований – математическое моделирование в энергетике. Имеет более 400 публикаций, в том числе 21 монографию. E-mail: zork@isem.irk.ru

Gubiy Elena Valerievna, a senior engineer at the department of applied mathematics in the Institute of Energy Systems, SB RAS. His research interests are focused on the efficiency and reliability of renewable energy use. He is the author of over 10 publications including 1 monograph. E-mail: egubiy@gmail.com

Zorkaltsev Valery Ivanovich, D.Sc. (Eng.), professor, head of the laboratory of mathematical modeling methods and optimization in energetic in the department of applied mathematics in the Institute of Energy Systems, SB RAS. His research interests are focused on mathematical modeling in energetic. He is the author of more than 400 including 21 monographs. E-mail: zork@isem.irk.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-181-196

Markov sequence of carryover fuel resources*

E.V. GUBIY^a, V.I. ZORKALTSEV^b

Energy Systems Institute, SB RAS, 130, Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation

^aegubiy@gmail.com ^bzork@isem.irk.ru

Abstract

The model is considered to analyze the reliability of remote settlement fuel supply with biomass from energy plantations. The influence of three random factors (in production, consumption and carryover fuel resources) is taken into account. The analysis of fuel supply reliability is based on the simulation modeling of the operation of the fuel supply system using the method of statistical testing. Random values of the needs and production of biofuels when imitating the functioning of the fuel supply system are formed by the Monte Carlo method.

A random value of fuel resources of long-term regulation in the model of fuel supply reliability analysis is generated by means of a special algorithm in the process of multiple simulation of fuel supply system operation. The results of theoretical and experimental studies of this algorithm are presented in this article. It is established that this algorithm develops a Markov sequence. Sufficient conditions for the uniqueness of the stationary state are determined. Based on experimental calculations the number of iterations to achieve a steady state is estimated as well as the number of iterations sufficient for the assessment of the reliability of fuel supply and the expected value of the cost of fuel supply with a different composition of the reserve funds is

Keywords: energy plantations, energy supply reliability, ergodicity, Monte Carlo method, stationarity

REFERENCES

1. Krasuska E., Cadorniga C., Tenorio J.L., Testa G., Scordia D. Potential land availability for energy crops production in Europe. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 2010, vol. 4, pp. 658–673.
2. Nordborg M., Berndes G., Dimitriou I., Henriksson A., Mola-Yudego B. Energy analysis of poplar production for bioenergy in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 112, pp. 110–120.
3. Driels M.R., Shin Y.S. *Determining the number of iterations for Monte Carlo simulations of weapon effectiveness*. Monterey, CA, Naval Postgraduate School, 2004. 31 p.
4. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. *Opisanie massiva dannykh sutochnoi temperatury vozdukha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR)* [Description of the data array on the daily air temperature and precipitation at meteorological stations in the Russian Federation]. Moscow: Gidrometizdat, 1998. 100 p.

* Received 12 October 2019.

The study was carried out as part of the research project III.17.4.4 of the basic research program of the SB RAS, reg. No. AAAA-A17-117030310436-7 and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Irkutsk Region (grant No. 17-410-380003).

logical stations in Russia and the former USSR (TTTR)]. Available at: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#opisanie-massiva-dannykh> (accessed 4.10.2018).

5. Velikanov M.A., Nekrasov A.S., Reznikovskii A.Sh. Otsenka asinkhronnosti mnogoletnikh kolebaniy raskhoda topliva pod deistviem geofizicheskikh faktorov [The evaluation of the asynchrony of many-year fluctuations in fuel consumption under the influence of geophysical factors]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR – Proceedings of Academy of Sciences. Power Engineering and Transport*, 1988, no. 2, pp. 151–157.

6. Zorkal'tsev V.I. *Mnogoletnie kolebaniya temperatur i problemy nadezhnosti toplivosnabzheniya* [Long-term temperature fluctuations and problems of reliability of fuel supply]. Irkutsk, ESI SB RAS Publ., 2015. 84 p.

7. Mazur Yu.A. *Problemy manevrennosti v razvitiy energetiki* [Maneuverability problems in the development of energy]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 94 p.

8. Hrilev L.S. O vliyaniy klimaticheskogo faktora na perspektivnuyu strukturu toplivno-energeticheskogo balansa [The impact of the climatic factor on the future configuration of the fuel and energy balance]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 1960, no. 2, pp. 16–20. (In Russian).

9. Gubiy E.V., Zorkaltsev V.I., Khazheev I.I. Analysis long-term of variation of air temperature for the purpose of energy reliability. *International conference “Advanced Mathematics, Computations and Applications – 2014”: abstracts*, Novosibirsk, 2014, pp. 56–57.

10. Gubiy E.V., Zorkaltsev V.I. [Analysis of reliability of settlement fuel supply with biofuel from energy plantations]. *Materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara im. Yu.N. Rudenko “Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki”* [Materials of the International scientific seminar named after Yu.N. Rudenko “Methodological issues of reliability study of large energy systems], Irkutsk, 2014, iss. 64, pp. 267–274. (In Russian).

11. Gubiy E.V., Zorkaltsev V.I. *Effektivnost' energeticheskikh plantatsii* [Energy plantation efficiency]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2018. 96 p.

12. Bendat J.S., Piersol A.G. *Measurement and analysis of random data*. New York, Wiley, 1967 (Russ. ed.: Bendat Dzh., Pirsol A. *Izmerenie i analiz sluchainykh protsessov*. Moscow, Mir Publ., 1971. 408 p.).

13. Gikhman I.I., Skorokhod A.V. *Teoriya sluchainykh protsessov*. T. 1 [Theory of random processes. Vol. 1]. Moscow, Mir Publ., 1971. 666 p.

14. Feller W. *An introduction to probability theory and its applications*. Vol. 1. 3rd ed., rev. New York, Wiley, 1970 (Russ. ed.: Feller V. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostei i ee prilozheniya*. T. 1. Moscow, Mir Publ., 1984. 528 p.).

15. Gubiy E.V. Matematicheskaya model' analiza nadezhnosti toplivosnabzheniya otdalennykh naseleennykh punktov biomasso s energeticheskikh plantatsii [Mathematical model to analyze reliability of remote settlement fuel supply with biomass from energy plantation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 102–113.

Для цитирования:

Губий Е.В., Зоркальцев В.И. Марковская последовательность переходящих запасов топлива // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 181–196. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-181-196.

For citation:

Gubiy E.V., Zorkaltsev V.I. Markovskaya posledovatel'nost' perekhodyashchikh zapasov topliva [Markov sequence of carryover fuel resources]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 181–196. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-181-196.

ЭНЕРГЕТИКА

ENERGETICS

УДК 621.311.019

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212

Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными осветительными устройствами*

В.П. КУЗЬМЕНКО^a, С.В. СОЛЕНЬ^b, В.Ф. ШИШЛАКОВ^c, О.Я. СОЛЕНАЯ^d

190000, РФ, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

^amr.konnny@gmail.com ^bssv555ssv@yandex.ru ^cosolenaya@list.ru

^dsvfmail@yandex.ru

В последние годы отмечается значительное ухудшение качества электрической энергии в сетях непромышленных потребителей, таких как торговые комплексы, офисные и жилые помещения, учебные заведения, сети наружного и фасадного освещения. Одной из причин обострения данной проблемы является постоянное увеличение использования светодиодного осветительного оборудования в электроустановках не только данного типа, но и всех типов в целом. Для выявления ухудшения качества электрической энергии в сетях непромышленных потребителей, таких как торговые комплексы, офисные и жилые помещения, учебные заведения, сети наружного освещения с массовым использованием светодиодных источников света, было решено поставить эксперимент по анализу качества электрической энергии в электроустановке здания одного из учебных заведений Всеволожского района, которое было постепенно полностью переведено на использование светодиодного осветительного оборудования в учебных классах, административных помещениях и рекреационных зонах здания школы и на уличных площадках.

В рамках проведенного исследования рассмотрены результаты влияния на спектральный состав токов и напряжений современных светотехнических приборов на основе светодиодов; выявлены негативные воздействия, которые приводят к росту тока в нулевом проводе даже при полностью симметричном характере нагрузки. Проведенные исследования показывают, что в распределительных сетях из-за светодиодных источников света наблюдаются значительные искажения формы кривых тока. Так, наличие полного гармонического искажения фазы с наибольшей осветительной нагрузкой сети в течение дня доходит до 90 %.

Данные исследования показывают, что, несмотря на заявленные в паспортах светильников данные, удовлетворяющие нормативным документам настоящего времени, массовое использование светодиодного осветительного оборудования приводит к проблемам, следствием которых может являться ухудшение качества электропитания, а значит, подобные нагрузки способны сильно усложнить жизнь потребителей электроэнергии, причиняя в том числе экономические убытки. Таким образом, вопрос модернизации оборудования и перехода на энергосберегающие технологии в виде светодиодных светильников все еще является неоднозначным.

* Статья получена 20 сентября 2018 г.

Ключевые слова: электроснабжение жилых и общественных зданий, электропроводка, качество электроэнергии, высшие гармоники тока и напряжения, электромагнитная совместимость, светодиодное освещение

ВВЕДЕНИЕ

С введением в России Федерального закона от 29.07.2018 № 255-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1], который стимулирует потребителей к применению энергосберегающих технологий и устройств в современных электроустановках, все больше используются световые приборы с повышенной энергоэффективностью, к которым в настоящее время относятся светодиодные светильники, лампы, прожекторы. Но данные осветительные устройства содержат в себе элементы с нелинейными вольтамперными характеристиками, что по сути дела усугубляет проблему качества электроэнергии в сетях административного и потребительского назначения [2].

Появление токов несинусоидальной формы является одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии. Появление высших гармоник тока и напряжения неблагоприятно влияет на работу электрооборудования, устройства релейной защиты, а также является одной из причин ухудшения качества сетей передачи информации, увеличивает наличие повышенных номиналов токов в нулевом проводнике, что вызывает процессы, ускоряющие старение изоляции.

Конечно, основным источником гармонических искажений в распределительных сетях являются нелинейные нагрузки крупных промышленных потребителей [3]. Однако в последние годы отмечается значительное ухудшение качества электрической энергии в сетях непромышленных потребителей, таких как торговые комплексы, офисные и жилые помещения, учебные заведения, сети наружного и фасадного освещения. Данную проблему связывают в том числе и с постоянно увеличивающимся использованием светодиодного осветительного оборудования в электроустановках не только данного типа, но и всех типов в целом.

В работе [4] подробно описано наличие нечетных гармоник в светодиодных прожекторах, приводящих к возможным явлениям резонанса токов данных гармоник.

Стоит также обратить внимание на то, что нередко производители, пытаясь сэкономить, прибегают к применению некачественных материалов, что в целом негативно влияет на стратегию энергоэффективного развития предприятий. Использование некачественной элементной базы приводит к реальному ухудшению характеристик электротехнических изделий [5].

Высшие гармоники тока и напряжения влияют на погрешности электроизмерительных приборов. В практике эксплуатации существенное значение имеет увеличение погрешностей индукционных счетчиков активной и реактивной энергии. Значения этих погрешностей существенно отражаются при учете потребления электрической энергии. Наличие высших гармоник затрудняет и в ряде случаев делает невозможным использование силовых цепей в качестве каналов для передачи информации [6].

Применение импульсных обратноходовых преобразователей широко распространено в светодиодных светильниках. Совместно с LC-фильтрами (например, выпрямитель с емкостным фильтром) они могут вызывать значительные искажения тока, что неизбежно ведет к искажению напряжения и, как следствие, к сокращению сроков службы и сбоям в работе потребителей электрической сети, ускоренному старению изоляции и др. [7].

Для выявления влияния данных факторов было решено поставить эксперимент по анализу качества электрической энергии в электроустановке административного здания учебного заведения МОУ «СОШ № 3» Всеволожского района, которое было постепенно полностью переведено на использование светодиодного осветительного оборудования в учебных классах, административных помещениях и рекреационных зонах здания школы и на уличных площадках.

Для измерения основных показателей качества электроэнергии, а также гармонических составляющих тока и напряжения использовался трехфазный анализатор параметров электросетей, качества и количества электроэнергии С.А 8335 QUALISTAR PLUS фирмы CHAVIN ARNOUX. Прибор является трехфазным графическим анализатором параметров электросети переменного и постоянного тока с высокой предельной синусоидальной мощностью измерительной категории IV в соответствии со стандартом ГОСТ IEC 61010-1-2014 [8]. Погрешность прибора СА 8335 точнее 1 % (погрешность датчиков тока не включена).

С помощью прибора можно провести следующие измерения:

- значения переменных напряжений до 1000 В между терминалами;
- значения переменного тока до 6500 А/с (нулевой провод включен);
- измерение минимальных и максимальных значений напряжения и тока полупериода;
- пиковые значения напряжения и тока (нулевой провод не включен);
- измерение частоты электросети в 50 Гц и 60 Гц;
- коэффициент амплитуды тока и напряжения (пик-фактор) (нулевой провод не включен);
- расчет К-фактора трансформатора составляющей тока (KF);
- коэффициент гармоник (DF) для тока и напряжения (нулевой провод не включен);
- общий коэффициент гармонических искажений для тока и напряжения (нулевой провод не включен);
- активная, реактивная (емкостная и индуктивная) и полная мощность отдельной фазы и всех фаз (нулевой провод не включен);
- вычисление $\cos(\varphi)$ коэффициента реактивной мощности (DPF) и коэффициента мощности (PF) (нулевой провод не включен);
- вычисление краткосрочных дрожаний (flicker) напряжения (PST) (нулевой провод не включен);
- измерение, вычисление и отображение гармоник тока и напряжения до 50-го порядка с их фазовой информацией: значения, процентное отношение, значения максимума.

Измерения проводились в соответствии с методикой, подробно изложенной в инструкции к прибору, которая соответствует ГОСТ 30804.4.30–2013 (IEC 61000-4-30:2008) [9].

Основной задачей данного эксперимента является определение влияния светодиодного осветительного оборудования на качество электроэнергии, спектральный состав токов и напряжений питающей сети, частоту и другие параметры электрической сети, а также выявление нелинейных характеристик элементной базы элементов питания светодиодного оборудования, сравнение фактических данных с заявленными в паспортах производителя изделия.

1. ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе эксперимента анализатор качества С.А 8335 QUALISTARPLUS был подключен сначала на один питающий ввод электроустановки административного здания, а затем на другой. Подключение прибора осуществлялось согласно инструкции – пофазно, с расположением контактных колец по направлению от питающих фидеров к отходящим линиям (рис. 1).

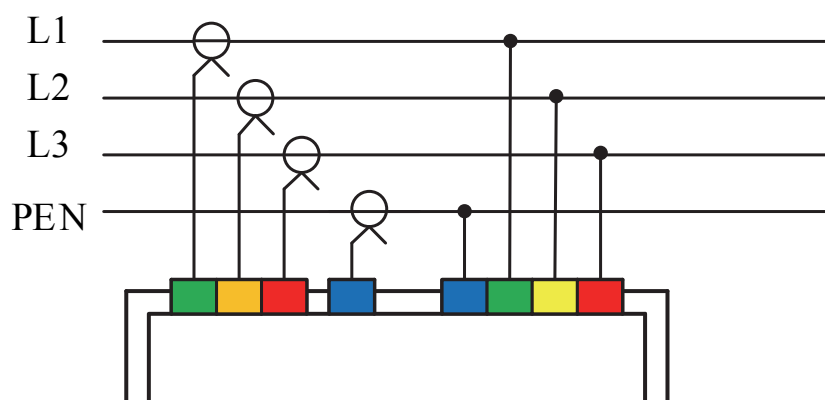


Рис. 1. Блок-схема подключения прибора

Fig. 1. Flow chart of the device

Прибор работал от сети круглосуточно в течение недели на одном вводе, а затем в течение недели – на другом. Данный способ постановки эксперимента был выбран для того, чтобы не препятствовать процессу обучения в учебном учреждении и определить исследуемые факторы непосредственно в самом рабочем процессе электроустановки и согласно распорядку дня учебного учреждения.

Здание школы оборудовано светодиодными светильниками типа PPO 1200/L 40W 4000K IP20 фирмы Jazzway (рис. 2) в рекреационных зонах и помещениях учебных классов, а также светильниками типа PPL 600 40w 4000K IP40 в административных и хозяйственных помещениях и учебных классах. Наличие в помещениях школы ламп накаливания и люминесцентных светильников не превышает 5 % от общего количества светильников. Здание школы также оборудовано светодиодными уличными прожекторами.



Рис. 2. Внешний вид светильника (фото с места установки)

Fig. 2. The lamp appearance on the installation site

Характеристики светильника PPO 1200/L 40W сведены в таблицу [10].

Характеристики светильника PPO 1200/L 40W

The PPO 1200/L 40W lamp characteristics

Источник света	светодиоды SMD2835
Количество светодиодов	38/76 шт.
Цветовая температура	4000 К, 6500 К
Угол освещения	120°
Индекс цветопередачи	Ra ≥ 75
Входная частота	50 Гц
Коэффициент пульсации	≤ 5 %
Материал корпуса	алюминиевый сплав
Материал плафона	опаловый поликарбонат
Тип рассеивателя	опаловый
Температура эксплуатации	-20...+40 °С
Срок службы светодиодов	25 000 часов
Напряжение драйвера	входное 180...240 В выходное: 30...42 / 90...100
Максимально допустимое количество светильников в линию	25 шт.
Драйвер типовой	PPS-CVP 12040 IP67
Мощность драйвера	40 / 60 Вт
Входное напряжение / выходной ток	100 / 0,70...264 / 0,32...3,3

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента представлены на соответствующих графиках, которые описывают поведение измеряемых параметров в зависимости от характеристик нагрузки электрической сети административного здания.

Для определения характера распределения нагрузок приведем график активной мощности, изображенный на рисунке ниже (рис. 3).

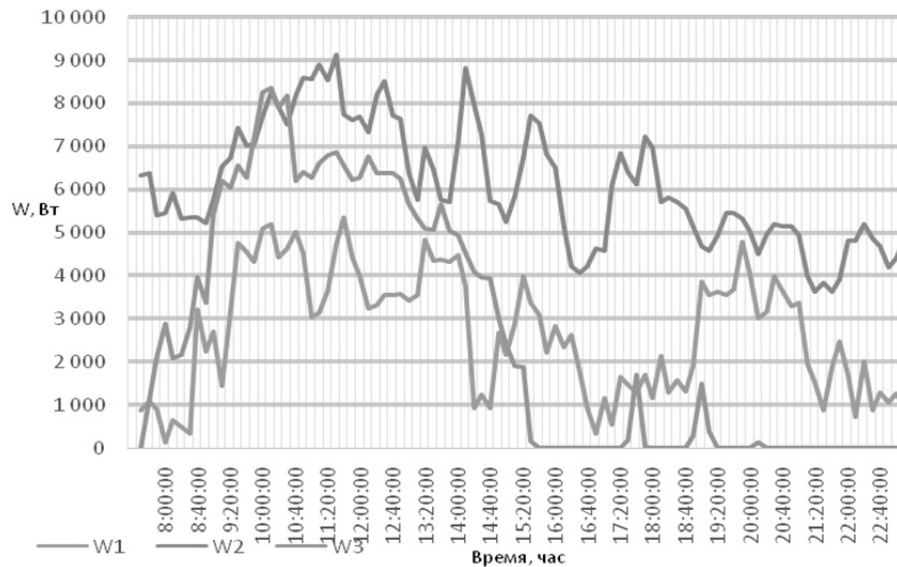


Рис. 3. График активной мощности

Fig. 3. Active power curve

По графику активной мощности, где $W1$ – активная мощность фазы A , $W2$ – активная мощность фазы B , можно определить характер распределения нагрузок пофазно, а также время загруженности той или иной фазы. Анализ осциллограммы (рис. 1) показывает, что фаза (кривая $W2$) имеет относительно постоянный характер нагрузки, в то время как фазы (кривые $W1$ и $W3$ соответственно) имеют промежуточный (дневной) характер нагрузки. Это связано с тем, что к фазе $W2$ помимо оборудования, востребованного в дневное время (компьютеры, освещение и др.), присоединено оборудование, используемое с большим коэффициентом спроса и в ночное время суток (вентиляция, сигнализация, видеонаблюдение, уличное освещение).

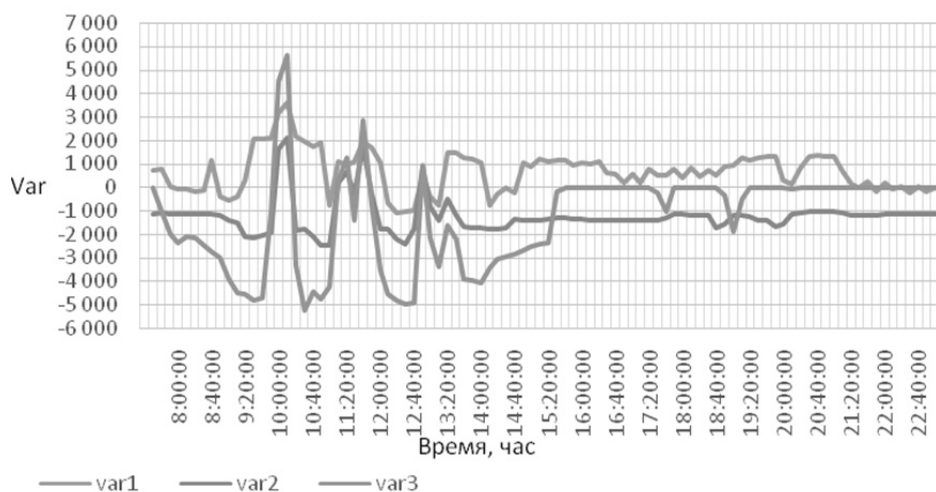


Рис. 4. График реактивной мощности

Fig. 4. Reactive power curve

Из графика реактивной мощности видно, что потребители имеют реактивную мощность, наиболее выраженную по фазе (кривая var3 – фаза C), на которую подключено наибольшее количество светодиодного осветительного оборудования.

На рис. 6 изображен график изменения значений тангенса $\text{tg}(f)$ по фазам.

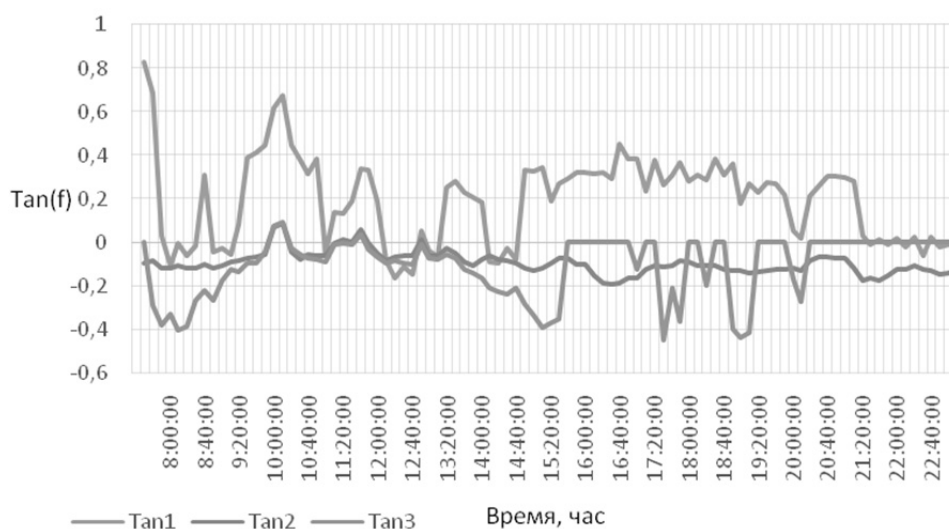


Рис. 5. График измерения параметров $\text{Tan}(f)$

Fig. 5. Graph of measurements of the $\text{Tan}(f)$ parameters

Отрицательные значения говорят о том, что в данный момент времени нагрузка на фазах под индексами Tan3 и Tan2 имеет ярко выраженный активно-емкостной характер [11]. Исходя из графика делаем вывод, что как минимум по двум фазам в течение дня $\text{Tan}(f)$ отрицательный, что говорит о весомом наличии активно-емкостной нагрузки. Это значит, что одну четверть периода энергия электромагнитного поля передается от источника к приемнику и накапливается там, вторую четверть – возвращается назад (считаем нагрузку чисто индуктивной или чисто емкостной, потери на перемагничивание отсутствуют, емкость идеальна, сопротивление проводов равно нулю) [12].

Активная энергия действительно потребляется электроприемниками, т. е. преобразуется в другие виды энергии (тепловую, механическую и т. д.), а реактивная ввиду особенности реактивных элементов накапливать энергию возвращается в сеть, загружая ее по сути вредоносной составляющей.

Выходом из создавшейся ситуации является применение конденсаторных компенсирующих устройств. Однако здесь нужно предостеречь от возможной перекомпенсации, когда реактивная энергия не потребляется, а генерируется.

Далее рассмотрим процентное содержание гармонической составляющей по току. Обратим внимание на нечетные гармоники, наиболее явно выраженные в данном случае, – 3 и 5, которые изображены на рис. 6 и 7. Также были обнаружены не характерные для такого вида нагрузки четные гармоники, их наличие в электрической сети варьируется от 0,5 до 2,5 %, чередуясь от 2-го до 10-го порядка.

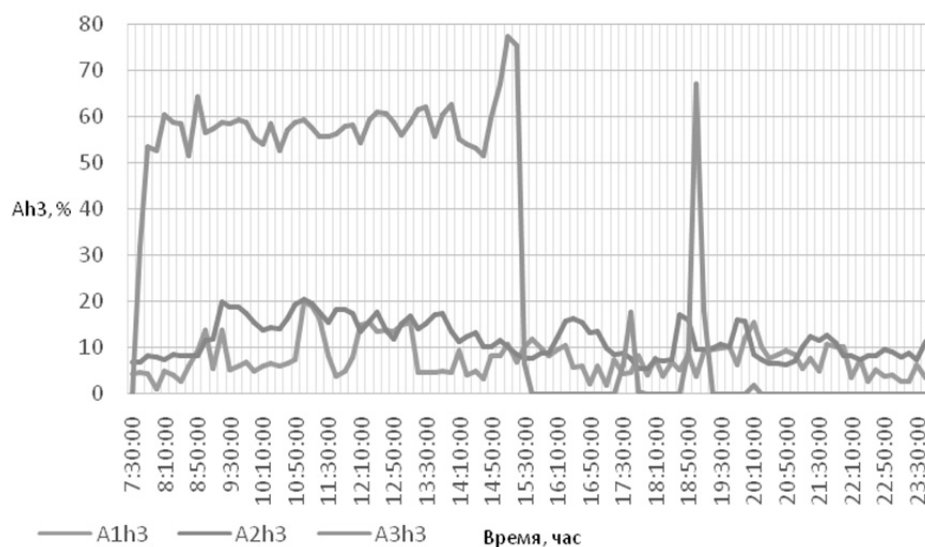


Рис. 6. Гармоническая составляющая 3-го порядка в процентном соотношении

Fig. 6. Harmonic component of the 3d order in percentage terms

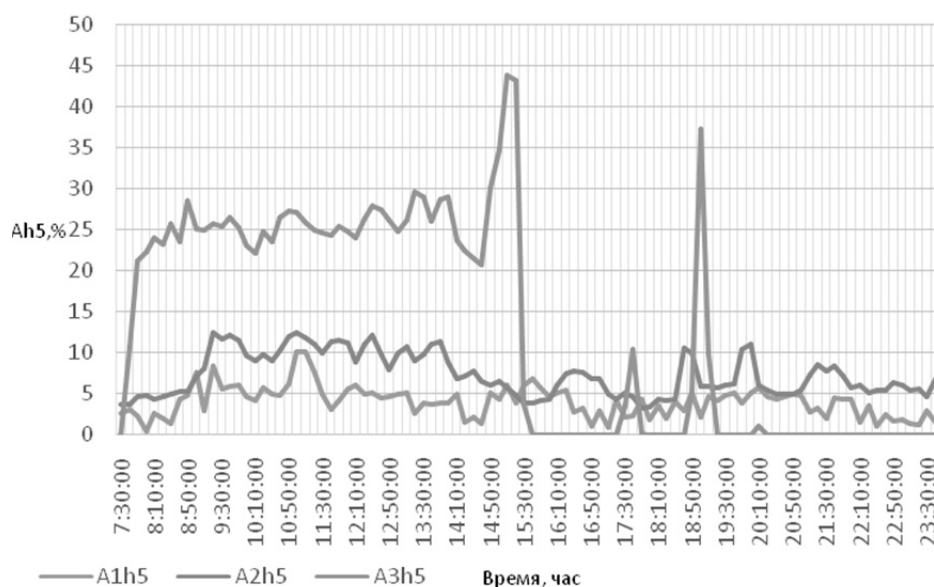


Рис. 7. Гармоническая составляющая 5-го порядка в процентном соотношении

Fig. 7. Harmonic component of the 5th order in percentage terms

Таким образом, наличие 3-й гармоники тока превышает предельно допустимое значение более чем на 40 %; наличие 7-й гармоники находится на пороге предельно допустимых значений, периодически имея сильные броски, выходящие за пределы этих значения; наличие 9-й и 11-й также находится в зоне предельно допустимых значений, периодически выходя из нее на 2...5 %, гармоники более высокого порядка заметны, но не выходят за пределы допустимых значений [4, 13].

На рис. 8 представлен график полного гармонического искажения по фазам.

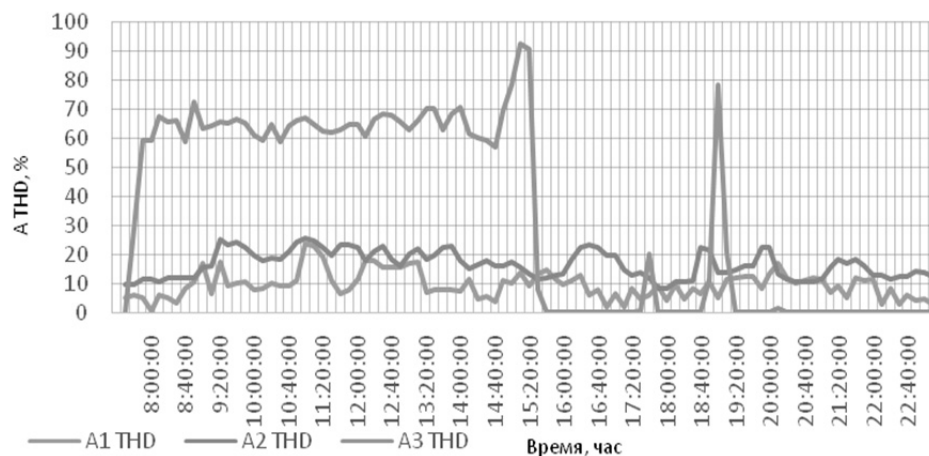


Рис. 8. График полного гармонического искажения

Fig. 8. Curve of full harmonic distortion

Основываясь на полученных графиках, можно сделать вывод, что измеренные значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения выходят за нормы, установленные в ГОСТ 32144-2013, вплоть до 11-го порядка, особенно сильно выражена фаза C (A3 THD) на графике (рис. 8).

На рис. 9 показаны среднеквадратические значения напряжения по фазам.

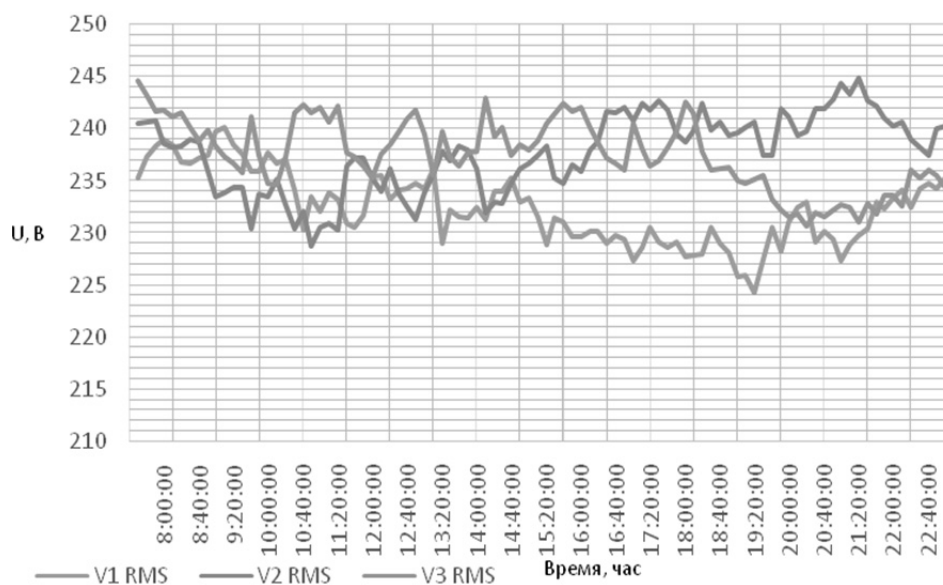


Рис. 9. Среднеквадратические значения напряжения

Fig. 9. Root-mean-square value of voltage

Из рис. 9 видно, что при резком возрастании нагрузки (в данном случае это включение освещения в помещениях школы) происходит резкое увеличение потерь напряжения в ветвях сети, питающих эту нагрузку. Но в тот же момент происходит заметный скачок напряжения (до 250 В) на приемном узле ветви, что говорит о потребителях с резкопеременным характером потребления мощности (особенно реактивной), что было бы нормальным для потребителей в заводских цехах, но никак не в административных зданиях [11, 14].

На рис. 10 представлен график максимумов краткосрочного дрожания (фликера).

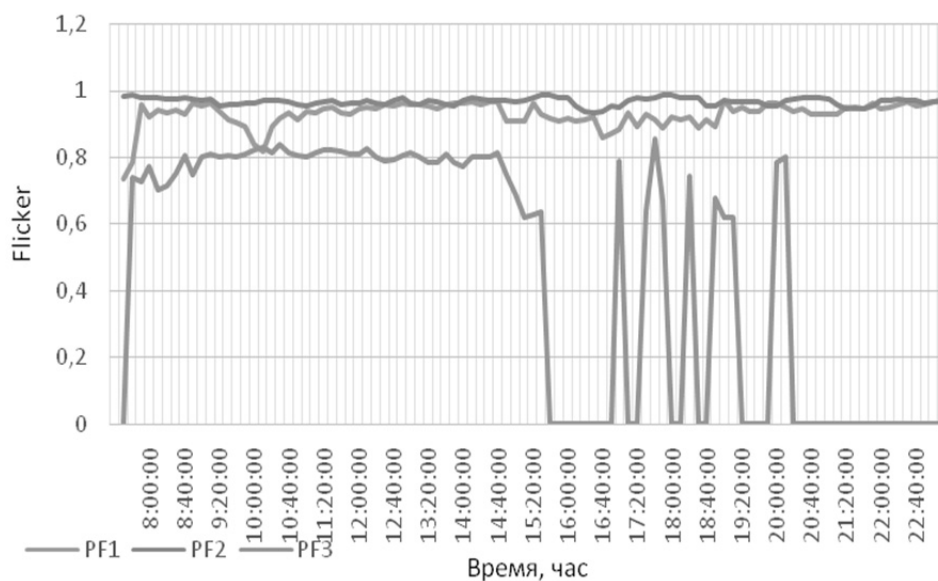


Рис. 10. Краткосрочное дрожание (фликер)

Fig. 10. Short-term jitter (flicker)

Фликер (от англ. flicker – «мигать») – субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей эти источники.

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера PSt в точках общего присоединения потребителей электрической энергии, располагающих лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, равно 1,0, а для длительной дозы фликера PLt в этих же точках равно 0,74 в интервале времени 10 минут. На графике видно, что в течение дня эти значения превышают допустимые нормы [15, 16].

Это явление вызывает ухудшение самочувствия, раздражение, иногда головные боли, т. е. вызывает дискомфорт и снижение эффективности работы у человека. Исследования показывают, что максимальная нагрузка возникает при частоте, равной примерно девяти изменениям освещенности в секунду, что эквивалентно частоте в 9 Гц [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные исследования показывают, что, несмотря на заявленные в паспортах светильников данные, удовлетворяющие нормативным документам настоящего времени, массовое использование светодиодного осветительного оборудования несет за собой проблемы, следствием которых может являться ухудшение качества электропитания, а также экономические убытки.

Также выявлено, что высшие гармоники могут вызывать перегрев проводов и нулевых шин, повреждения конденсаторов в системах компенсации мощности, проблемы коммутации, особенно для устройств защитного отключения, а также приводить к периодическому изменению светового потока в результате изменения напряжения питания освещения [18].

Проведенные исследования показывают, что в распределительных сетях из-за светодиодных источников света наблюдаются значительные искажения формы кривых токов. Так, наличие 3-й гармоники тока превышает предельно допустимое значение более чем на 40 %, наличие 7-й, 9-й, 11-й гармоник – на 2...5 %. Гармоники более высокого порядка также заметны, но не выходят за пределы допустимых значений. Также были заметны нехарактерные для такого вида нагрузки четные гармоники, их наличие в электрической сети варьируется от 0.5 до 2.5 %. В результате наличие полного гармонического искажения фазы с наибольшей осветительной нагрузкой сети в течение дня доходит до 80...90 %. Полученные данные явно противоречат нормально допустимым значениям, которые в соответствии с ГОСТом в номинальном режиме не должны превышать 8 %, а в предельно допустимом – 12 % [16, 19].

Во многих случаях уровень искажений превышает пределы, определяемые государственными стандартами [13,16]. Кроме того, такие источники света приводят к росту тока в нулевом проводе даже при полностью симметричном характере нагрузки [20] и, как следствие, к аварийным ситуациям из-за перегорания нулевого провода.

Наиболее простым решением для наружного освещения будет установка пассивных фильтров гармоник в распределительной сети освещения. В работе [3] показано, что наибольшую эффективность такой фильтр будет иметь при включении в сеть одновременно с включением электроприемника, для которого он предназначен. Со световыми приборами бытового назначения не все так однозначно, так как невозможно прогнозировать количество и распространенность таких световых приборов у населения. Поэтому для решения такой задачи наиболее подходящими были бы активные фильтры [2]. При этом стоимость активного фильтра для бытовой сети будет как минимум на порядок выше [21].

Таким образом, модернизация оборудования и переход на энергосберегающие технологии могут привести к ухудшению качества электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 29.07.2018 № 255-ФЗ «О внесении изменений в статьи 7 и 22 Федерального закона “Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации”».
2. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ / С.А. Темербаев, Н.П. Боярская, В.П. Довгун, В.О. Колмаков // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2013. – № 1. – С. 107–120.

3. Боярская Н.П., Довгун В.П., Кунгс Я.А. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса / Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2012. – 123 с.
4. Сактоев В.Е., Баташов А.И., Чередов Э.Н. Исследование характеристик светодиодного светильника RC-R251-001 // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2017. – № 1. – С. 49–55.
5. Фазлиева Я.С., Ахмадеева О.А. Проблемы энергосбережения и энергоэффективности зданий в России [Электронный ресурс] // Молодой ученый. – 2016. – № 7. – С. 1020–1022. – URL: <https://moluch.ru/archive/111/27864/> (дата обращения: 29.03.2019).
6. Степанов В.М., Базыль И.М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – № 12-2. – С. 27–31.
7. Розанов Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 632 с. – ISBN 978-5-383-00403-6.
8. ГОСТ ИЕС 61010-1–2014. Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. Ч. 1. Общие требования. – Введ. 2015–09–01. – М.: Стандартиформ, 2015. – 130 с.
9. ГОСТ 30804.4.30–2013 (ИЕС 61000-4-30:2008). Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – Введ. 2014–01–01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 52 с.
10. Официальный сайт торговой марки Jazzway, производителя светодиодного оборудования [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.jazz-way.com/> (дата обращения: 29.03.2019).
11. Розанов Ю.К., Лепанов М.Г. Силовая электроника: учебник и практикум для СПО. – М.: Юрайт, 2018. – 206 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 978-5-534-05204-6.
12. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.
13. ГОСТ 33073–2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартиформ, 2015. – 41 с.
14. Ананичева С.С., Алексеев А.А., Мызин А.Л. Качество электроэнергии: регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие. – 3-е изд., испр. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 93 с.
15. ГОСТ Р 55710–2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.
16. ГОСТ Р 51317.3.2–2006 (МЭК 61000-3-2:2005). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – Введ. 2007–07–01. – М.: Стандартиформ, 2007. – 23 с.
17. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шароль, А.Ю. Воробьев; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.
18. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях: пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
19. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
20. Боярская Н.П., Довгун В.П. Влияние светодиодных источников света на спектры токов и напряжений питающей сети // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2014. – № 3. – С. 195–199.
21. Официальный сайт компании ООО «Хомов электро», производителя компенсирующих устройств [Электронный ресурс]. – URL: <http://khomovelectro.ru/articles/aktivnye-i-passivnye-filtry-garmonik-primenenie-problemy-i-tendentsii.html> (дата обращения: 29.03.2019).

Кузьменко Владимир Павлович, аспирант кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Основные направления научных исследований: энергосбережение и повышение энергетической эффективности, электроизмерения, светодиодные источники света. Является автором 6 публикаций. E-mail: mr.konnny@gmail.com

Солёный Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, заместитель директора по научной работе Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Основные направления научных исследований: электро-, пожаро- и взрывобезопасность; развитие систем «Умный дом» и Smart Grid; надежность сложных по структуре схем систем электроснабжения; робототехника; киберфизические системы. Является автором 170 публикаций, включая одну монографию, 9 учебных пособий и 37 статей в ведущих научных отечественных и зарубежных издательствах; 23 публикации, входящие в системы Scopus, Web of Science и РИНЦ, 7 патентов на полезную модель, а также один патент на промышленный образец. E-mail: ssv555sv@yandex.ru

Солёная Оксана Ярославовна, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, заместитель директора по учебно-воспитательной работе Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Основные направления научных исследований: энергосбережение и повышение энергетической эффективности; развитие методов оценки безопасности технологических объектов. Является автором 95 публикаций, включая 5 учебных пособий и 30 статей в ведущих научных отечественных и зарубежных издательствах; 25 публикаций, которые входят в системы Scopus, Web of Science и РИНЦ, 11 патентов на полезную модель, а также один патент на изобретение. E-mail: osolenaya@list.ru

Шишлаков Владислав Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления в технических системах, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике, проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Основное направление научных исследований – синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала. Является автором более 200 публикаций, включая 3 монографии, 15 учебных пособий и 56 статей в ведущих научных отечественных и зарубежных издательствах; 30 публикации, входящих в системы Scopus, Web of Science и РИНЦ, 5 патентов на изобретение. E-mail: svfmail@yandex.ru

Kuzmenko Vladimir Pavlovich, a postgraduate student at the department of electromechanics and robotics at the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The main field of his research includes power supply and increasing power efficiency, electrical measurements and LED sources of lighting. He has published 6 research papers. E-mail: mr.konnny@gmail.com

Solenyj Sergei Valentinovich, PhD (Eng.), an associate professor at the department of electromechanics and robotics at the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; deputy head for research in the Institute of Innovation Technologies in Electromechanics and Robotics at the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. His research interests are focused on electric, fire and explosion safety, development of Smart House and Smart Grid systems, reliability of sophisticated power supply systems, robotics and cyber-physical systems. He is the author of 190 publications including 1 monograph and 9 teaching manuals and 37 papers in leading scientific Russian and foreign journals, among them 23 papers in the Scopus, Web of Science and RSCI systems. He is also the holder of 7 useful model patents and 1 patent for a design. E-mail: ssv555sv@yandex.ru

Solenaja Oksana Yaroslavovna, an associate professor at the department of electromechanics and robotics at the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; deputy head for teaching and educational work in the Institute of Innovation Technologies in Electromechanics and Robotics in the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Her research interests are focused on power supply and increasing power efficiency, and development of methods of technological object safety assessment. She is the author of 95 publications including 5 teaching manuals and 30 papers in leading scientific Russian and foreign journals, among them 25 papers in the Scopus, Web of Science and RSCI systems. She is also the holder of 11 useful model patents and 1 patent for a design. E-mail: osolenaya@list.ru

Shishlakov Vladislav Fedorovich, D. Sc. (Eng.), professor, head of the department of control in engineering systems; director of the Institute of Innovation Technologies in Electromechanics and Robotics; vice-rector for educational technologies and innovative activities in

the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. His research interests are focused on nonlinear systems of automatic control with different kinds of signal modulation. He is the author of more than 200 publications including 3 monographs, 15 teaching manuals and 56 papers in leading scientific Russian and foreign journals, among them 30 publications in the Scopus, Web of Science and RSCI systems. He is also the holder of 5 patents for a design. E-mail: svfmail@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212

Measurement of power quality in the power supply system with LED lightning devices*

V.P. KUZMENKO^a, S.V. SOLYONYJ^b, V.F. SHISHLAKOV^c, O.Ya. SOLYONAJA^d

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B Morskaja Street, St. Petersburg, 190000, Russian Federation

^amr.konnny@gmail.com ^bssv555sv@yandex.ru ^cosolenaya@list.ru

^dsvfmail@yandex.ru

Abstract

In recent years there has been a significant deterioration in the quality of electrical energy in non-industrial consumer networks, such as shopping malls, offices, educational institutions, and outdoor and facade lights. One of the reasons for the aggravation of this problem is an increase in the usage of LED lighting equipment. To determine the effect of LED lighting equipment on electric power quality, measurement methods based on spectral analysis methods, comparison of the data obtained experimentally with the data recorded in the manufacturers' passports, identification of parameters beyond the limits established by state standards and other regulatory documents were used according to GOST 33073-2014, GOST 30804.4.30-2013, GOST IEC 61010-1-2014. They were used to check such parameters as the spectral composition of the currents and voltages of the supply power system, the frequency of the electrical network, and also the identification of the nonlinear characteristics of the element base of LED equipment. The effect of modern lighting devices based on LEDs on the spectral composition of currents and voltages is considered, and negative effects that lead to increasing electrical current in the neutral wire, even with a completely symmetrical nature of the load, are identified. The research shows that there are significant distortions in the shape of current curves in electrical power systems due to LED light sources. So, the presence of full harmonic phase distortion with the greatest lighting load of the power system during the day amounts to up to 90%. This research shows that a massive use of LED lighting equipment causes problems that can deteriorate power quality, and therefore make the situation for electricity consumers more difficult including economic losses.

Keywords: power supply of residential and public buildings, electrical wiring, power quality, high harmonics of current and voltage, electromagnetic compatibility, LED lighting

REFERENCES

1. *Federal'nyi zakon ot 29.07.2018 N 255-FZ "O vnesenii izmenenii v stat'i 7 i 22 Federal'nogo zakona "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoi effektivnosti i o vnesenii izmenenii v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii"* [On amendments to articles 7 and 22 of the Federal Law "On energy saving and improving energy efficiency and amending certain legislative acts of the Russian Federation"].

* Received 20 September 2018.

2. Temerbaev S.A., Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Kolmakov V.O. Analiz kachestva elektroenergii v gorodskikh raspredelitel'nykh setyakh 0,4 kV [Analysis of power quality in distribution grids 0,4 kV]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2013, no. 1, pp. 107–120.

3. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Kungs Ya.A. *Problemy kompensatsii vysshikh garmonik v raspredelitel'nykh setyakh agropromyshlennogo kompleksa* [Problems of compensation of higher harmonics in the distribution networks of the agro-industrial complex]. Krasnoyarsk State Agrarian University. Krasnoyarsk, 2012. 123 p.

4. Saktov V.E., Batashov A.I., Cheredov E.N. Issledovaniye kharakteristik svetodiodnogo svetil'nika RC-R251-001 [The research of the led lamp RC-R251-001 characteristics]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya. – ESSUTM Bulletin*, 2017, no. 1, pp. 49–55.

5. Fazlieva Ya.S., Akhmadeeva O.A. Problemy energosberezheniya i energoeffektivnosti zdaniy v Rossii [Problems of energy saving and energy efficiency of buildings in Russia]. *Molodoi uchenyi – Young Scientist*, 2016, no. 7, pp. 1020–1022. Available at: <https://moluch.ru/archive/111/27864/> (accessed 29.03.2019).

6. Stepanov V.M., Bazyl I.M. Vliyanie vysshikh garmonik v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatiya na poteri elektricheskoi energii [The effect of higher harmonics in the power supply system electricity companies]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – News of the Tula state university. Technical sciences*, 2013, no. 12-2, pp. 27–31.

7. Rozanov Yu.K. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 2nd ed. Moscow, MEI Publ., 2009. 632 p. ISBN 978-5-383-00403-6.

8. *GOST IEC 61010-1–2014. Bezopasnost' elektricheskikh kontrol'no-izmeritel'nykh priborov i laboratornogo oborudovaniya. Ch. 1. Obshchie trebovaniya* [State Standard 61010-1–2014. Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use. Pt. 1. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 130 p.

9. *GOST 30804.4.30–2013 (IEC 61000-4-30:2008). Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmerenii pokazatelei kachestva elektricheskoi energii* [State Standard 30804.4.30–2013 (IEC 61000-4-30:2008). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 52 p.

10. *Ofitsial'naya sait torgovoi marki Jazzway, proizvoditelya svetodiodnogo oborudovaniya* [The official website of the brand Jazzway, a manufacturer of LED equipment]. Available at: <https://www.jazz-way.com/> (accessed 29.03.2019).

11. Rozanov Yu.K., Lapanov M.G. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurait Publ., 2018. 206 p. ISBN 978-5-534-05204-6.

12. *GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144–2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.

13. *GOST 33073–2014. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Kontrol' i monitoring kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 33073–2014. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Control and monitoring of electric power quality in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 41 p.

14. Ananicheva S.S., Alekssev A.A., Myzin A.L. *Kachestvo elektroenergii: regulirovanie napryazheniya i chastoty v energosistemakh* [Power quality. Voltage and frequency regulation in power systems]. 3rd ed. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2012. 93 p.

15. *GOST R 55710–2013. Osveshchenie rabochikh mest vnutri zdaniy. Normy i metody izmerenii* [State Standard R 55710–2013. Lighting of indoor work places. Norms and methods of measuring]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.

16. *GOST R 51317.3.2–2006 (MEK 61000-3-2:2005). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Emissiya garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom ne bolee 16 A (v odnoi faze). Normy i metody ispytaniy* [State Standard R 51317.3.2–2006 (IEC 61000-3-2:2005). Electromagnetic compatibility of equipment. Harmonic current emissions (equipment input current [not more] 16 A per phase). Limits and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 23 p.

17. Kartashev I.I., Tul'skii V.N., Shamonov R.G., Sharol' Yu.V., Vorob'ev A.Yu. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* [Power quality management]. Moscow, MEI Publ., 2006. 320 p.
18. Kusko, Alexander *Power quality in electrical systems*. New York, McGraw-Hill, 2007 (Russ. ed.: Kusko A., Tompson M. *Kachestvo energii v elektricheskikh setyakh*. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2008. 336 p.).
19. Arrilaga Dzh., Bredli D., Bodzher P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh: per.s angl.* [Harmonics in electrical systems] – M: Energo-atomizdat, 1990.
20. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P. Vliyaniye svetodiodnykh istochnikov sveta na spektry tokov i napryazhenii pitayushchei seti [The light-emitting diode light sources influence on the currents spectra and the supply net voltages]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – The Bulletin of KrasGAU*, 2014, no. 3, pp. 195–199.
21. *Ofitsial'nyi sait kompanii OOO "Khomov elektro", proizvoditelya kompensiruyushchikh ustroystv* [Official site of LLC Homov Electro, a manufacturer of compensating devices]. Available at: <http://khomoelectro.ru/articles/aktivnye-i-passivnye-filtry-garmonik-primenenie-problemy-i-tendentsii.html> (accessed 29.03.2019).

Для цитирования:

Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения с светодиодными осветительными устройствами / В.П. Кузьменко, С.В. Соленьий, В.Ф. Шишлаков, О.Я. Соленья // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 197–212. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212.

For citation:

Kuzmenko V.P., Solyonyj S.V., Shishlakov V.F., Solyonaya O.Ya. Izmerenie kachestva elektroenergii v sisteme elektrosnabzheniya s svetodiodnymi osvetitel'nymi ustroystvami [Measurement of power quality in the power supply system with LED lightning devices]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 197–212. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212.

ЭНЕРГЕТИКА

ENERGETICS

УДК 621.311

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-213-223

Влияние дополнительных емкостей на переходные восстанавливающиеся напряжения в режиме неудаленных коротких замыканий*

**ДЖ.Б. РАХИМОВ^a, Ш.М. СУЛТОНОВ^b, ДЖ.С. АХЪЁЕВ^c,
ДЖ.Х. ХУДЖАСАИДОВ^d**

730092, РТ, г. Душанбе, ул. акад. Раджабовых, 10, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

^ajam-rahimov@mail.ru ^bsultonzoda.sh@mail.ru ^cjavod_66@mail.ru
^djahon_nstu@mail.ru

При отключении коротких замыканий (КЗ) на контактах высоковольтных выключателей (ВВ) появляется переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН). Наибольший вклад в ПВН вносит составляющая восстанавливающегося напряжения (ВН) между контактом выключателя и землей со стороны воздушной линии электропередач (ЛЭП), имеющая пилообразный характер колебаний. Складываясь на основную составляющую ВН со стороны источника питания, эти высокочастотные колебания пилообразного типа оказывают влияние на скорость нарастания ПВН и этим затрудняют отключение тока КЗ выключателями. Как показывает мировой опыт, предотвратить такого рода аварии можно с помощью дополнительных емкостей, установленных между фазными выводами выключателя. Для оценки влияния дополнительных емкостей на скорости нарастания ПВН была принята схема электрической сети 110 кВ, разработанная с помощью программного комплекса EMTP-RV. Целью исследования является разработка технических рекомендаций по уменьшению скорости возрастания ПВН на контактах элегазовых ВВ при отключении КЗ на воздушных ЛЭП на некоторое расстояние от шин распределительных устройств (РУ). Приведены подробные результаты расчетов скорости нарастания и пикового значения ПВН на контактах элегазового выключателя 110 кВ при отключении тока КЗ на ЛЭП до и после установки на выводах выключателей дополнительных емкостей, равных 30, 40, 50 и 60 нФ. В результате исследования и анализа полученных значений скоростей нарастания ПВН на контактах элегазового выключателя при отключении КЗ на воздушных ЛЭП при разновидности параметров схемы было установлено, что при выборе дополнительной емкости необходимо учитывать емкость на землю электрооборудования, которое установлено на рассматриваемой подстанции (ПС), в том числе количество, сечения и длины проводников воздушных ЛЭП, присоединенных к шинам РУ. При уменьшении емкости электрооборудования на землю или отключении части отходящих воздушных ЛЭП от шин РУ скорость нарастания ПВН на контактах элегазового выключателя увеличивается.

* Статья получена 04 сентября 2018 г.

Ключевые слова: переходные восстанавливающиеся напряжения, выключатель, неудаленное короткое замыкание, короткое замыкание, конденсаторная батарея, линия электропередачи, высоковольтный выключатель, программный комплекс EMTP-RV

ВВЕДЕНИЕ

Наравне со значениями периодической и апериодической составляющих тока КЗ в узлах и на воздушных ЛЭП электрических сетей важным параметром, который характеризует отключающую способность ВВ, является допустимая скорость возрастания ПВН, которая, в свою очередь, влияет на напряжение между контактами выключателя, возникающее после гашения электрической дуги в нем.

Проектирование и реконструкция электрических сетей и электрических станций, а также определение скорости возрастания до пиковых значений ПВН на контактах ВВ в момент отключения тока КЗ может быть необходимым шагом на этапе выбора ВВ и для проверки ВВ, находящихся в эксплуатации, на соответствие отключающей способности при электромагнитных аварийных переходных процессах.

При происхождении КЗ на воздушных ЛЭП на небольшом расстоянии от выводов выключателя неизменно фигурируют определенные значения сопротивления линии. Это значение сопротивления препятствует току КЗ, т. е. приводит к уменьшению тока КЗ, а также является основным условием для поддержания некоторого уровня напряжения в электроэнергетической системе u_0 . После отключения тока КЗ на воздушной ЛЭП электрический заряд может освободиться и начать равномерное распределение по длине воздушной ЛЭП от точки КЗ до выводов ВВ. Данный электромагнитный аварийный переходный процесс может быть представлен в виде независимого движения в противоположном направлении двух косоугольных волн, имеющих пиковое значение напряжения $u_0 / 2$. Доходя до места КЗ и разомкнутого полюса ВВ, полуволны могут быть отражены с помощью коэффициентов, которые соответственно равны $K_{от} = +1$ и $K_{от} = -1$. Из-за потерь данный электромагнитный аварийный переходный процесс длится до момента снижения напряжения и тока до нуля [1, 2, 4, 5].

Составляющая скорость нарастания ВН со стороны воздушной ЛЭП в начальный момент аварийного переходного процесса значительно больше составляющей скорости нарастания ВН со стороны источника питания [5–8, 10, 11, 13]. При выборе ВВ в электрических сетях электроэнергетических систем, номинальное напряжение которых 110 кВ и выше, эта характерная особенность должна учитываться [9].

С увеличением значений токов КЗ в высоковольтных узлах электрических сетей электроэнергетических систем критическое условие работы большинства типов ВВ с $U_{ном} \geq 110$ кВ определяется отключающей способностью КЗ на воздушных ЛЭП на небольшом расстоянии от шин РУ. При неудаленном КЗ на воздушной ЛЭП скорость возрастания, первое амплитудное и пиковое значения ПВН складываются из составляющих источника питания и составляющих воздушной ЛЭП. Составляющая ВН со стороны воздушной ЛЭП имеет пилообразный характер колебаний. Частота таких

колебаний обратно пропорциональна, а амплитуда восстанавливающегося напряжения прямо пропорциональна значению расстояния от выводов ВВ до точки КЗ, расположенной на ЛЭП.

Известны случаи, когда несоответствие скорости нарастания и пиковых значений ПВН характеристикам выключателя приводили к его выходу из эксплуатации в процессе отключения КЗ [1].

Для ликвидации таких видов аварий проводятся специальные технические мероприятия, разработанные на базе расчета и анализа электромагнитных аварийных переходных процессов, которые возникают при отключении КЗ на воздушных ЛЭП на некотором расстоянии от ВВ.

Как видно из мировой практики, для снижения скорости возрастания ПВН на выводах ВВ при отключении токов КЗ наиболее эффективно использовать дополнительные емкости, которые установлены к фазным выводам контактов выключателя со стороны воздушных ЛЭП [14–17].

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа и исследования влияний дополнительных емкостей на скорости возрастания и пикового значений ПВН на контактах ВВ в момент отключения тока КЗ на воздушной ЛЭП на некотором расстоянии от шин РУ была рассмотрена ПС со следующими исходными данными:

- номинальное напряжение $U_{\text{НОМ}} = 110$ кВ;
- номинальный ток отключения элегазового выключателя $I_{\text{НОМ.ОТК}} = 40$ кА;
- значение тока КЗ на шинах РУ $I_{\text{КЗ}} = 40$ кА;
- отношение тока КЗ на ЛЭП к току КЗ на выводах элегазового выключателя $M = 0,85$;
- значение тока КЗ на ЛЭП при $M = 0,85$ $I_{\text{КЗ.ВЛ}} = 34$ кА;
- количество отходящих воздушных ЛЭП от шин РУ $n = 4$ шт.;
- длина и сечение проводов отходящих воздушных ЛЭП от шин РУ $l = 50$ км и АС $F = 240$ мм²;
- эквивалентная емкость на землю электрооборудования, которое установлено на ПС, $C_c = 50$ нФ.

Для оценки влияния дополнительной емкости на параметры ПВН на контактах элегазового выключателя 110 кВ с использованием программного комплекса EMTP–RV был смоделирован электромагнитный аварийный переходный процесс с учетом параметров дугогасящей камеры, т. е. проводимость дуги, ток дуги, постоянное значение напряжение дуги, постоянное значение потери мощности, постоянное время Кэсси и постоянное время Майра.

На рис. 1 показана схема замещения электрической сети при подключении дополнительных емкостей к контактам ВВ со стороны воздушной ЛЭП и земли C_d .

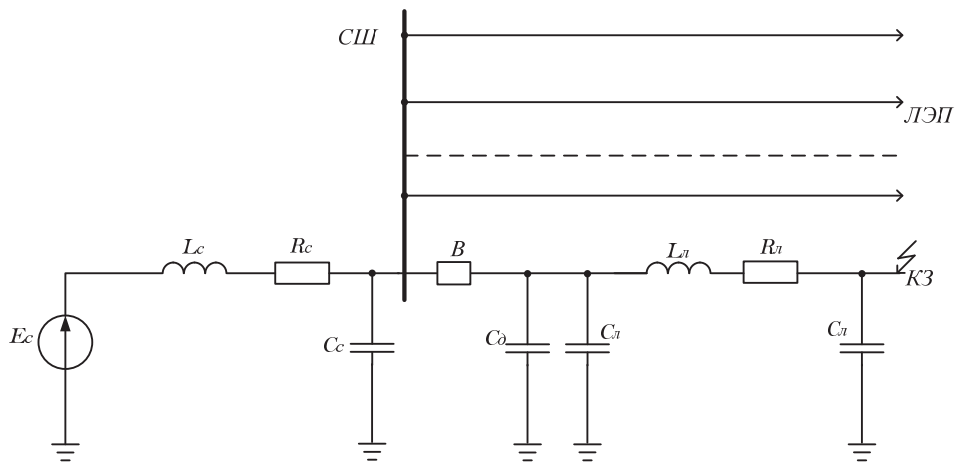


Рис. 1. Схема замещения электрической сети для расчета ПВН с подключением дополнительной емкости

Fig. 1. The equivalent circuit of the electrical network with the connection of an additional capacity for the TRV calculation

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В таблице приведены результаты расчетов скорости нарастания и первое амплитудное значение ПВН на контактах ВВ 110 кВ ликвидации КЗ на воздушной ЛЭП до и после установки дополнительных емкостей, равных 30, 40, 50 и 60 нФ.

Таблица 1

Table 1

Результаты расчетов параметров ПВН

The results of the TRV parameter calculations

C_d , нФ	S , кВ/мкс	u_1 , кВ
0	7,18	33,01
30	2,539	48,24
40	2,346	53,97
50	2,205	55,13
60	2,197	57,13

На рис. 2 показаны расчетные кривые ПВН на контактах ВВ с $U_{ном} = 110$ кВ при ликвидации тока КЗ на воздушной ЛЭП до и после установки дополнительных емкостей, равных 30, 40, 50 и 60 нФ.

На рис. 3 в развернутом виде показаны кривые изменения характеристик ПВН на элегазовом выключателе с $U_{ном} = 110$ кВ при ликвидации тока КЗ на воздушной линии до и после установки дополнительных емкостей, равных 30, 40, 50 и 60 нФ, условная граничная линия ПВН и линия запаздывания ПВН согласно ГОСТ Р 52565–2006.

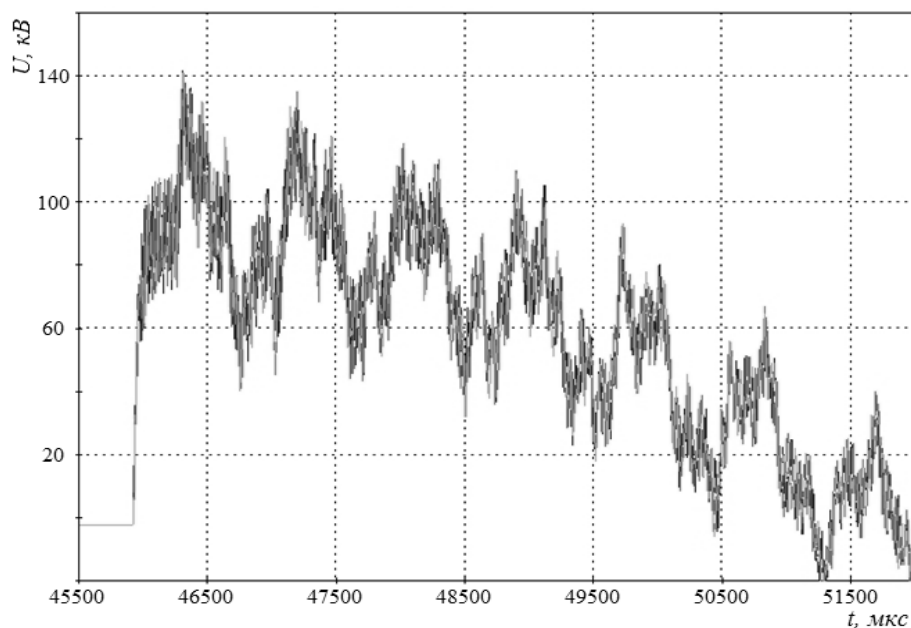


Рис. 2. Расчетные кривые ПВН до и после установки дополнительных емкостей

Fig. 2. Calculated TRV curves before and after installation of additional capacities

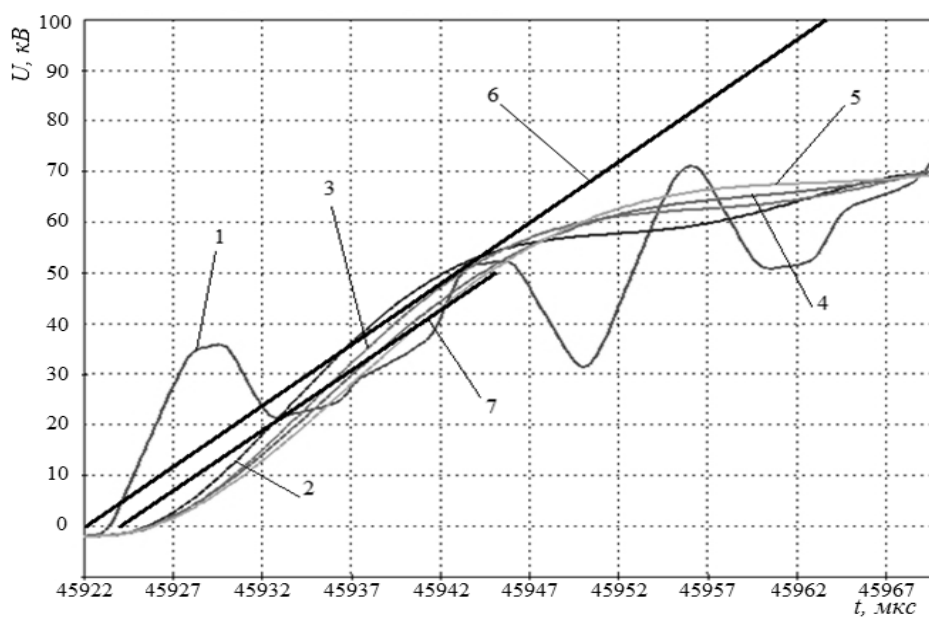


Рис. 3. Расчетные кривые ПВН до (кривая 1) и после установки емкостей $C_d = 30$ нФ (кривая 2), $C_d = 40$ нФ (кривая 3), $C_d = 50$ нФ (кривая 4), $C_d = 60$ нФ (кривая 5), условная граничная линия ПВН (кривая 6) и линия запаздывания ПВН (кривая 7)

Fig. 3. Calculated TRV curves before (curve 1) and after installation of capacities $C_d = 30$ nF (curve 2), $C_d = 40$ nF (curve 3), $C_d = 50$ nF (curve 4), $C_d = 60$ nF (curve 5), conditional TRV boundary line (curve 6) and TRV delay line (curve 7)

Из рис. 3 можно увидеть, что при ликвидации тока КЗ на воздушной ЛЭП на некоторое расстояние от элегазового выключателя до подключения дополнительных емкостей скорость возрастания ПВН (кривая 1) превышает допустимые значения ПВН (кривая 6), а также дважды переходит линию запаздывания ПВН (кривая 7). Также видно, что при подключении на выводах элегазового выключателя дополнительной емкости, равной 40 нФ, скорость нарастания ПВН (кривая 3) не пересекает допустимые значения ПВН (кривая 6) и лишь один раз пересекает линию запаздывания (кривая 7). Снижение скорости нарастания ПВН при подключении дополнительной емкости на контактах ВВ со стороны воздушной ЛЭП объясняется тем, что дополнительная емкость снижает высокочастотные колебания составляющих ВН со стороны воздушной ЛЭП. После анализа полученных характеристик изменения ПВН можно прийти к выводу о том, что чем больше значения подключенных дополнительных емкостей на выводах ВВ со стороны воздушной ЛЭП, тем меньше скорость возрастания ПВН.

При анализе результатов полученных значений скоростей возрастания ПВН на выводах ВВ в режиме удаленного КЗ при изменении показателей схемы соединения электрооборудования на ПС было выявлено, что при выборе дополнительных емкостей необходимо учитывать емкость на землю электрооборудования, которое установлено на рассматриваемой ПС, а также количество, сечения и длины проводов отходящих воздушных ЛЭП от шин РУ. При снижении емкости на землю электрооборудования или отключении части отходящих воздушных ЛЭП от шин РУ скорость нарастания ПВН на контактах элегазового выключателя увеличивается. Поэтому дополнительная емкость с параметрами, рассчитанными для шин ПС с большей емкостью на землю электрооборудования и с большим количеством отходящих воздушных ЛЭП от шин РУ, не приведет к снижению высокочастотных колебаний составляющих ВН со стороны воздушной ЛЭП до значений, при которых скорость нарастания ПВН не выходит за пределы допустимых значений ПВН. Например, при уменьшении емкости на землю электрооборудования, установленной на рассматриваемой выше ПС с 50 нФ до 25 нФ, и при отключении двух отходящих воздушных ЛЭП N_d от шин РУ дополнительная емкость, равная 40 нФ, не приведет к снижению скорости нарастания ПВН до нормируемого значения (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что при расчете скорости возрастания до пикового значения ПВН на выводах ВВ и при выборе значений дополнительных емкостей необходимым условием является учет значений емкости протекающих в землю от электрооборудования, установленного на рассматриваемой ПС, и также от количества линий присоединенных к шинам РУ ВН, которые в значительной мере могут повлиять на значение параметров скорости возрастания ПВН.

Следовательно, рекомендуется снижение скорости возрастания ПВН с помощью добавления конденсаторов, подключаемых к фазным выводам выключателя со стороны воздушной линии и на шинах ПС. Добавочные конденсаторы могут быть заменены экранированным силовым кабелем, один из концов которого подключается к выводам выключателя, а второй конец снабжается заглушкой из диэлектрического материала.

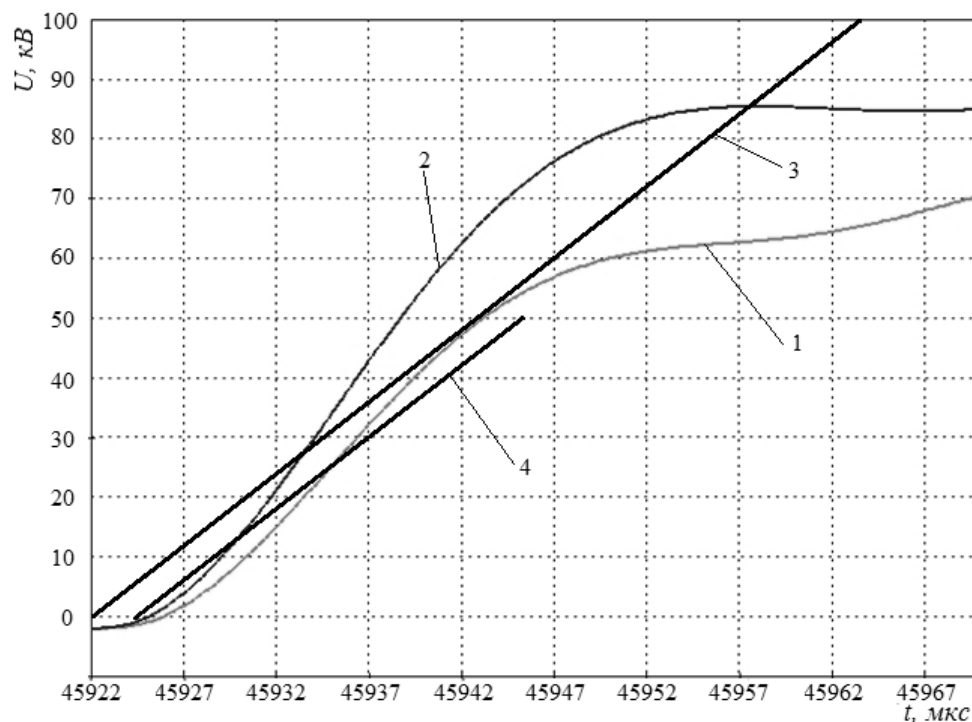


Рис. 4. Расчетные кривые ПВН после установки дополнительной емкости $C_d = 40$ нФ при суммарной емкости на землю электрооборудования 50 нФ и $N_L = 4$ шт. (кривая 1) и 25 нФ и $N_L = 2$ шт. (кривая 2), условная граничная линия ПВН (кривая 3) и линия запаздывания ПВН (кривая 4)

Fig. 4. Calculated TRV curves after installing additional capacity $C_d = 40$ nF with total capacity to ground of electrical equipment 50 nF and $N_L = 4$ pcs. (curve 1) and 25 nF and $N_L = 2$ pcs. (curve 2), the conditional boundary line PVN (curve 3) and the PVN delay line (curve 4)

Например, при необходимости добавочной емкости в 40 нФ для снижения скорости возрастания ПВН на выводах выключателя до допустимого значения необходимым считается подключение экранированного силового кабеля сечением не менее 500 мм^2 и длиной не более 206 м к выводам элегазового выключателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные рекомендации позволяют уменьшить скорость возрастания ПВН для ликвидации и отключения неудаленных токов КЗ на воздушных ЛЭП до допустимых пределов.

2. Подключенные к фазным выводам выключателя со стороны ЛЭП дополнительной емкости позволяет уменьшать скорость возрастания ПВН.

3. Рекомендовано использование экранированного силового кабеля в качестве дополнительной емкости, который с одной стороны подключается к выводам выключателя, а с другой стороны заглушен заглушкой из диэлектрического материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акодис М.М., Корзун П.А. Определение восстанавливающихся напряжений на контактах выключателя. – М.: Энергия, 1968. – 192 с.
2. Humphries M.B. Transient recovery voltage in the short line fault regime // Current interruption in high voltage networks. – New York: Plenum Press, 1978. – P. 29–65.
3. Проверка выключателей высокого напряжения по параметрам переходных восстанавливающихся напряжений / Ю.П. Гусев, Л.С. Касобов, А.Г. Каюмов, Дж.Б. Рахимов // Энергетик. – 2017. – № 9. – С. 28–30.
4. Colclaser R.G., Beehler J.E., Garrity T.F. A field study of the short-line-fault component of transient recovery voltage // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1975. – Vol. 94, no. 6. – P. 1943–1953.
5. Рахимов Дж.Б. Оценка соответствия отключающей способности выключателей токам коротких замыканий и переходным восстанавливающимся напряжениям в энергосистеме Республики Таджикистан: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – М., 2018. – 160 с.
6. Habedank U. Application of a model for the evaluation of short circuit breaking test // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – Vol. 8 (4). – P. 1921–1925.
7. ГОСТ Р 52565–2006. Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. – Введ. 2007–04–01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 91 с.
8. Неклепаев Б.Н. Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах. – М.: Энергия, 1978. – 152 с.
9. IEC 60909-0. Short-circuit currents in three-phase a. c. systems. Part 0: Calculation of currents. – Geneva, 2001. – 160 p.
10. IEC 62271-100. High-voltage switchgear and controlgear. Part 100: High-voltage alternating-current circuit-breakers. – Geneva, 2003. – 588 p.
11. ANSI/IEEE Std. C37.06–2009. IEEE Standard for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis-preferred ratings and related required capabilities for voltages above 1000 V. – New York, 2009. – 46 p.
12. Denis D. Transient recovery voltages (TRVs) for high-voltage circuit breakers. Pt. 1. – San Antonio, USA, 2013. – 186 p.
13. Волков М.С., Гусев Ю.П. Оценка влияния характеристик токоограничивающего реактора на переходные восстанавливающиеся напряжения на контактах выключателя при отключении токов короткого замыкания // Наука и образование. – 2013. – № 7. – С. 329–336.
14. Гусев Ю.П., Насыр уулу К., Рахимов Дж.Б. Анализ возможных причин задержки прохождения тока через нуль в линии «Датка Кемин» при отключении коротких замыканий // Вестник КРСУ. – 2017. – Т. 17, № 5. – С. 54–60.
15. Kizilcay M. Breaking capability of a SF6 circuit breaker for short circuits close to a generation unit with delayed current zero crossing // International Conference on Power Systems Transients (IPST 2011). – Delft, Netherland, 2011.
16. Sluis L.V. Transients in power systems. – Chichester; New York: John Wiley & Sons, 2001. – 217 p.
17. Координация уровней токов коротких замыканий в электроэнергетической системе Кыргызстана / Ю.П. Гусев, К. Насыр уулу, Дж.Б. Рахимов, К.Б. Алиев // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – 2017. – Т. 41, № 1-1. – С. 25–30.

Рахимов Джамшиед Бобомуродович, старший преподаватель кафедры «Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. Основное направление научных исследований – переходные процессы в электроэнергетических системах. Имеет более 10 публикаций. E-mail: jam-rahimov@mail.ru

Султонов Шерхон Муртазокулович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. Основное направление исследований – оптимизация режимов ГЭС в энергетических системах. Автор более 30 публикаций. E-mail: sultonzoda.sh@mail.ru

Ахъёев Джавод Саламшоевич, ассистент кафедры «Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. Основное направление научных исследований – мониторинг и диагностика технического состоя-

ния электрооборудования на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики. Имеет более 25 публикаций. E-mail: javod_66@mail.ru

Худжасаидов Джахонгир Худжасаидович, ассистент кафедры «Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. Основное направление научных исследований – оптимизация режимов работы электроэнергетических систем. Имеет более 20 публикаций. E-mail: jahon_nstu@mail.ru

Rahimov Dzhamsheed Bobomurodovich, a senior lecturer at the department of electric plants, Tajik Technical University. The main field of his research includes transient processes in electric power systems. He is the author of over 10 publications. E-mail: jam-rahimov@mail.ru

Sultonov Sherhon Murtazokulovich, PhD (Eng.), head of the department of electric plants, Tajik Technical University. His research interests are focused on the optimization of hydroelectric plant modes in power systems. He is the author of over 30 publications. E-mail: sultonzoda.sh@mail.ru

Ahyoev Dzhavod Salamshoevich, a teaching assistant at the department of electric plants, Tajik Technical University. The main field of his research includes monitoring and diagnostics of electric equipment technical condition based on the theory of fuzzy sets and fuzzy logic. He is the author of over 25 publications. E-mail: javod_66@mail.ru

Khudzasaidov Dzhahongir Khudzasaidovich, a teaching assistant at the department of electric plants, Tajik Technical University. His research interests are focused on the optimization of electric power system modes. He is the author of over 20 publications. E-mail: jahon_nstu@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-213-223

Effect of additional capacities on transients recovery voltage in the short – line fault mode*

*J.B. RAHIMOV^a, SH.M. SULTONOV^b, J.S. AHYOEV^c,
Dzh.Kh. KHUDZHASAIIDOV^d*

Tajik Technical University, 10, Acad. Rajabovikh Street, Dushanbe, 730092, Tajikistan

*ajam-rahimov@mail.ru bsultonzoda.sh@mail.ru cjavod_66@mail.ru
djahon_nstu@mail.ru*

Abstract

A transient recovery voltage (TRV) appears across the contacts of high-voltage circuit breakers (CB) with short-circuit clearing. The component of the recovery voltage (RV) between the contact of the CB and the earth from the side of electric transmission lines which has the sawtooth wave character makes the greatest contribution to TRV. Being superimposed on the main component of the RV from the voltage source these high-frequency sawtooth waves cause a very high rate of TRV rise and thus make it difficult for CBs to cut off short circuit currents. World experience shows that it is possible to prevent such accidents by installing additional capacities between the line terminals of the CB. To evaluate the effect of additional capacities on the rate of TRV rise a 110 kV electric circuit network was designed by using the EMTP – RV software package. The aim of the study is to develop recommendations on reducing the rate of TRV rise across the contacts of the 110 kV SF6 circuit breaker when disconnecting short-circuit on overhead transmission lines at some distance from the distribution unit (DU) buses. Detailed results of calculations of the PVN parameters on the contacts of a 110 kV SF6 circuit breaker are given when the short-circuit current on the transmission line is disconnected before and after the installation of additional 30, 40, 50 and 60 nF capacitors. As a result of the analysis of the obtained values of the rates of a PVN rise across the contacts of the SF6 circuit break-

* Received 04 September 2018.

er when disconnecting short-circuit on overhead transmission lines and varying various parameters of the circuit, it has been found that when selecting an additional capacitance, it is necessary to take into account the capacitance to ground of the electrical equipment installed at the substation under study and linear connections the DU buses. When reducing electrical equipment capacitance to ground or disconnecting a part of linear connections of the DU buses, the rate of PVN rise across the contacts of the SF6 circuit breaker increases.

Keywords: transient recovery voltage, circuit breaker, short – line fault, short circuit current, capacitor, power line, high-voltage circuit breaker, EMTP-RV software package

REFERENCES

1. Akodis M.M., Korzun P.A. *Opređenje vosstanavlivayushchikhsya napryazhenii na kontaktakh vyklyuchatelya* [Determination of the recoverable voltages at the switch contacts]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 192 p.
2. Humphries M.B. Transient recovery voltage in the short line fault regime. *Current interruption in high voltage networks*. New York, Plenum Press, 1978, pp. 29–65.
3. Gusev Yu.P., Kasobov L.S., Kayumov A.G., Rahimov J.B. Proverka vyklyuchatelei vysokogo napryazheniya po parametram perekhodnykh vosstanavlivayushchikhsya napryazhenii [Inspection of high-voltage circuit breakers on parameters of transient recovery voltages]. *Energetik*, 2017, no. 9, pp. 28–30. (In Russian).
4. Colclaser R.G., Beehler J.E., Garrity T.F. A field study of the short-line-fault component of transient recovery voltage. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1975, vol. 94, no. 6, pp. 1943–1953.
5. Rahimov J.B. *Otsenka sootvetstviya otklyuchayushchei sposobnosti vyklyuchatelei tokam korotkikh zamykaniy i perekhodnym vosstanavlivayushchimsya napryazheniyam v energosisteme Respubliki Tadjikistan*. Diss. kand. tekhn. nauk [Assessment of the disconnecting ability of short-circuit current switches and transient voltages in the power supply system of the Republic of Tajikistan. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2018. 160 p.
6. Habedank U. Application of a model for the evaluation of short circuit breaking test. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993, vol. 8 (4), pp. 1921–1925.
7. *GOST R 52565–2006. Vyklyuchateli peremennogo toka na napryazhenie ot 3 do 750 kV. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard R 52565–2006. Alternating-current circuit-breakers for voltages from 3 to 750 kV. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 91 p.
8. Neklepaev B.N. *Koordinatsiya i optimizatsiya urovnei tokov korotkogo zamykaniya v elektricheskikh sistemakh* [Coordination and optimization of short-circuit current levels in electrical systems]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 152 p.
9. *IEC 60909-0. Short-circuit currents in three-phase a. c. systems. Part 0: Calculation of currents*. Geneva, 2001. 160 p.
10. *IEC 62271-100. High-voltage switchgear and controlgear. Part 100: High-voltage alternating-current circuit-breakers*. Geneva, 2003. 588 p.
11. *ANSI/IEEE Std. C37.06–2009. IEEE Standard for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis-preferred ratings and related required capabilities for voltages above 1000 V*. New York, 2009. 46 p.
12. Denis D. *Transient recovery voltages (TRVs) for high-voltage circuit breakers*. Pt. 1. San Antonio, USA, 2013. 186 p.
13. Volkov M.S., Gusev Yu.P. Otsenka vliyaniya kharakteristik tokoogranichivayushchego reaktora na perekhodnye vosstanavlivayushchiesya napryazheniya na kontaktakh vyklyuchatelya pri otklyuchenii tokov korotkogo zamykaniya [Estimating the influence of current limiting coil's properties on transient recovery voltages at contacts of a high-tension switch in case of fault currents' cut-off]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman – Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 7, pp. 329–336.
14. Gusev Yu.P., Nasyr uulu K., Rahimov J.B. Analiz vozmozhnykh prichin zaderzhki prokhozheniya toka cherez nul' v linii "Datka Kemin" pri otklyuchenii korotkikh zamykaniy [Analyze of possible causes delays zero crossing of current while faults clearing in line "Datka-Kemin"]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta – Vestnik KRSU*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 54–60.

15. Kizilcay M. Breaking capability of a SF6 circuit breaker for short circuits close to a generation unit with delayed current zero crossing. *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2011)*, Delft, Netherland, 2011.

16. Sluis L.V. *Transients in power systems*. Chichester, New York, John Wiley & Sons, 2001. 217 p.

17. Gusev Yu.P., Nasyr uulu K., Rahimov J.B., Aliyev K.B. Koordinatsiya urovnei tokov korotkikh замыканий v elektroenergeticheskoi sisteme Kyrgyzstana [Levels coordination of short circuit currents in electricpower system of Kyrgyzstan]. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova – News KSTU im. I. Razzakov*, 2017, vol. 41, no. 1-1, pp. 25–30. (In Russian).

Для цитирования:

Влияние дополнительных емкостей на переходные восстанавливающиеся напряжения в режиме неудаленных коротких замыканий / Дж.Б. Рахимов, Ш.М. Султонов, Дж.С. Ахьёев, Дж.Х. Худжасаидов // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 213–223. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-213-223.

For citation:

Rahimov J.B., Sultonov Sh.M., Ahyoev J.S., Khudzasaidov Dzh.Kh. Vliyanie dopolnitel'nykh emkosteï na perekhodnye vosstanavlivayushchiesya napryazheniya v rezhime neudalennykh korotkikh замыканий [Effect of additional capacities on transients recovery voltage in the short-line-fault regime]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 213–223. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-213-223.

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, с межстрочным интервалом с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение, Постановка задачи, Методы анализа, Основной результат, Выводы** или **Заключение**) – прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис.* и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в подписях не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные надписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте 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 с отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий, e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском 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>.