
СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 1 (81)

2021

УДК 681.51(06)
С 409

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

Гайдух 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 и 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, 2021

© Новосибирский государственный
технический университет, 2021

СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 1 (81)

2021

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Боева В.А., Воскобойников Ю.Е., Мансуров Р.Ш. Непараметрическая идентификация элементов системы терморегулирования.....	7
Воевода А.А., Филюшов В.Ю. Полиномиальное матричное разложение при синтезе неквадратных САУ	21
Гринкевич В.А. Синтез регулятора для нелинейных объектов с запаздыванием методом разделения движений с применением критериев устойчивости	39
Грицай А.С., Чебаненко Е.В., Потапов В.И., Андреева Е.Г., Хамитов Р.Н., Червенчук И.В. О разработке программно-аппаратного комплекса моделирования электросетевого контроллера и объектов микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии в сетях НН 0,4 кВ	61
Кальтюк И.С., Французова Г.А., Гунько А.В. Начальные этапы проектирования системы сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа.....	73
Майстренко А.В., Майстренко К.А., Светлаков А.А. Дихотомия. Дихотомия? Дихотомия! Модифицированный метод дихотомии решения нелинейных скалярных уравнений и некоторые результаты его исследований.....	85
Попов Е.А., Шорников Ю.В. Язык моделирования гетерогенных динамических систем LISMA_HDS	103

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Белавская С.В., Геворгян И.С., Лисицына Л.И., Навроцкий Л.Г. Биофизическая модель процесса распознавания картин ответной реакции кожного покрова на оптическую активацию.....	123
Правила для авторов	135

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

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

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 № ФС77-76010 от 03 июля 2019 г.

Периодичность издания – 4 номера в год.

Подписано в печать 23.03.2021. Выход в свет 26.03.2021.

Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.

Уч.-изд. л. 12,25. Печатных листов 8,75. Издательский № 36. Заказ № 359

Цена договорная

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

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 1 (81)

2021

УДК 681.51(06)
C 409

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Xi Zhaohui, Harbin University of Science and Technology, China

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

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

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

Editorial 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, 2021

© Novosibirsk State Technical University, 2021

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 1 (81)

2021

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Boeva V.A., Voskoboinikov Yu.E., Mansurov R.Sh. Non-parametric identification of thermal control system elements	7
Voevoda A.A., Filiushov V.Yu. Polynomial matrix decomposition for the synthesis of non-square control systems	21
Grinkevich V.A. Controller design by the motion separation method with applying stability criterions for non-linear objects with transport delays	39
Gritsay A.S., Chebanenko E.V., Potapov V.I., Andreeva E.G., Khamitov R.N., Cherven-chuk I.V. On the development of a software and hardware complex for modeling a power grid controller and microgeneration facilities based on renewable energy sources in LV 0,4 kV networks	61
Kalytyuk I.S., Frantsuzova G.A., Gun'ko A.V. Initial stages of designing a system for collecting and predictive analysis of social media data	73
Maistrenko A.V., Maistrenko K.A., Svetlakov A.A. Dichotomy. Dichotomy? Dichotomy! A modified method of dichotomy for solution of nonlinear scalar equations and some results of its investigation.....	85
Popov E.A. Shornikov Yu.V. LISMA_HDS language for modeling heterogeneous dynamic Systems	103

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION MEASUREMENT DEVICES AND SYSTEMS

Belavskaya S.V., Gevorgyan I.S., Lisitsyna L.I., Navrotsky L.G. A biophysical model of the recognition process of skin response patterns to optical activation.....	123
Rules for authors	135

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

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

The journal is registered by Russian Federation Committee on the press.
The certificate on registration of mass media of PI No. ФС77-73010 of July 03, 2019.
Publication frequency – 4 numbers a year.
Signed in print March 23, 2021.
Date of publication March 26, 2021. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 12,25. Printed pages 8,75.
Publishing number 36. Order number 359

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

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.51:519.6

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-7-20

Непараметрическая идентификация элементов системы терморегулирования*

В.А. БОЕВА^{1,a}, Ю.Е. ВОСКОБОЙНИКОВ^{1,2,b}, Р.Ш. МАНСУРОВ^{1,c}

¹ 630008, РФ, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

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

^a v.bojeva@sibstrin.ru ^b voscob@mail.ru ^c rmansurov@inbox.ru

Система терморегулирования «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» представляет собой соединение трех различных подсистем с разными законами функционирования. Из-за сложности физических процессов, протекающих в них, в настоящей работе для математического описания функционирования этих систем принята модель «черного ящика», «внутренности» которого не детализируются. Для стационарных линейных систем в качестве соотношения, устанавливающего связь между входом и выходом «черного ящика», принимается интегральное уравнение Вольтерра первого рода с неизвестным разностным ядром, которое в теории автоматического регулирования называется импульсной переходной функцией системы (ИПФ). Поэтому при использовании модели «черного ящика» как для описания каждой подсистемы в отдельности, так и для всей системы в целом необходимо оценить ИПФ системы в целом и ИПФ каждой из трех подсистем. Это условие существенно усложняет процедуру непараметрической идентификации из-за того, что выходной сигнал одной подсистемы может являться входным сигналом другой подсистемы, и эта специфика исключает использование схем активной идентификации. Формально оценивание ИПФ можно рассматривать как решение интегрального уравнения первого рода относительно его ядра по зарегистрированным (с погрешностями) дискретным значениям входного и выходного сигналов. Такая задача является некорректно поставленной, поскольку решение (в нашем случае это оценка ИПФ) может обладать неустойчивостью относительно погрешностей регистрации (шумов измерения) входных и выходных сигналов идентифицируемой системы. Для получения единственного и устойчивого решения используют регуляризирующие алгоритмы, но указанная специфика эксперимента по идентификации ИПФ системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» не позволяет использовать их вычислительные методы (СЛАУ, или дискретное преобразование Фурье). Поэтому в настоящей работе для решения задач идентификации ИПФ рассматриваемых системы и подсистем используются

* Статья получена 12 октября 2020 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90041. Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90041.

два алгоритма идентификации, которые в полной мере учитывают специфику решаемой задачи. В этих алгоритмах оценки ИПФ строятся с использованием первых производных от сигналов идентифицируемой системы, для устойчивого вычисления которых применяется сглаживающий кубический сплайн с оригинальным выбором параметра сглаживания. Приводимые в работе результаты идентификации реальной системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» и результаты ее моделирования показывают эффективность предлагаемого подхода к непараметрической идентификации сложных теплофизических систем.

Ключевые слова: система терморегулирования, модель «черного ящика», задача непараметрической идентификации, некорректно поставленные задачи, интегральное уравнение Вольтера I рода, устойчивые алгоритмы идентификации, переходный процесс, климатическая система, относительная избыточная теплота

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Встречающиеся на практике системы терморегулирования, основной задачей которых является стабилизация параметров микроклимата на заданном объекте, можно рассматривать как соединение нескольких разнотипных, но более простых подсистем с различными физическими процессами, протекающими в них. В настоящей работе рассматриваемая система терморегулирования представляется последовательной структурой «воздухонагреватель–вентилятор–помещение». Очевидно, что нестабильность работы такой системы вызвана воздействием изменяющихся тепловых возмущений. Реакция на возникающие возмущения – переходный процесс системы – будет определять качество параметров микроклимата и устойчивость системы в целом [1]. В связи с этим возникает необходимость экспериментального изучения переходных характеристик теплообмена климатических систем, наиболее информативной из которых является импульсная переходная функция (ИПФ) системы. Знание такой характеристики позволит:

- выполнить моделирование работы системы в различных режимах, включая «критические» режимы, которые опасны для реальной системы;
- вычислить оптимальные законы управления системой для перевода системы из одного состояния в другое.

Поэтому целью настоящей работы является идентификация ИПФ системы терморегулирования в целом и ее подсистем, и для этого решаются следующие задачи:

- разработка математической модели системы терморегулирования;
- исследования специфических особенностей входных и выходных сигналов идентифицируемых подсистем;
- устойчивая идентификация ИПФ при ступенчатом входном сигнале;
- устойчивая идентификация ИПФ при произвольном входном сигнале.

При решении двух последних задач используются результаты публикации [2].

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Для успешного выполнения структурной идентификации системы терморегулирования (т. е. представления системы в виде отдельных подсистем) изложим основы физических процессов, происходящих в системе терморегулирования. Также рассмотрим особенности входных и выходных сигналов идентифицируемых подсистем.

На рис. 1 показана схема движения потока теплоты, выделяемой / поглощаемой влажным воздухом при прохождении через элементы исследуемой системы терморегулирования. Массовый расход воздуха при обработке экспериментальных данных определялся соотношением $G = \rho(T_3)uF$, где F – площадь сечения воздуховода, m^2 , в месте установки датчиков скорости u и температуры T_3 ; $\rho(T_3)$ – плотность сухого воздуха, kg/m^3 , определяемая по температуре T_3 . Количество теплоты (КТ), поглощаемое потоком от воздухонагревателя (ВН): $Q_h = c_a G \Delta T_h$, от вентилятора (ВЕНТ): $Q_f = c_a G \Delta T_f$, от установки: $Q_s = c_a G \Delta T_s$, где c_a – теплоемкость воздуха; $\Delta T_h = T_2 - T_1$, $\Delta T_f = T_3 - T_2$ и $\Delta T_s = T_3 - T_1$. Количество теплоты, ассимилируемое и аккумулируемое в воздушном объеме помещения (ПОМ) при прохождении потока через него, рассчитывалось по формуле: $Q_r = c_a G \Delta T_r$, где $\Delta T_r = T_4 - T_3$. Количество теплоты, удаляемое потоком из помещения во внешнюю среду: $Q_e = c_a G \Delta T_e$, где $\Delta T_e = T_4 - T_1$. В качестве параметра подобия, описывающего рассматриваемые переходные процессы, как и в работе [3], было предложено использовать относительную избыточную теплоту (ОИТ) Q_i^r , что позволило выявить качественные закономерности в развитии переходных процессов в потоке влажного воздуха при прохождении через элементы системы терморегулирования и ПОМ. Тогда для определения ОИТ

$$Q_i^r = \frac{Q_i(\tau) - Q_i(0)}{|Q_i(\tau_*) - Q_i(0)|}, \quad i = 1 \dots 4, \quad (1)$$

где Q_i^r при $i = 1$ – ОИТ Q_h^r , выделяемая / поглощаемая потоком при прохождении через ВН; при $i = 2$ – ОИТ Q_f^r , выделяемая / поглощаемая потоком при прохождении через ВЕНТ; при $i = 3$ – ОИТ Q_r^r , ассимилируемая потоком при прохождении через ПОМ; при $i = 4$ – ОИТ Q_s^r , выделяемая / поглощаемая потоком при прохождении через установку; $Q_i(\tau)$, $Q_i(0)$, $Q_i(\tau_*)$ – теплота, выделяемая элементом в текущий момент времени τ , в начальный момент времени $\tau = 0$ и в конечный момент времени $\tau_* = 500$ с.

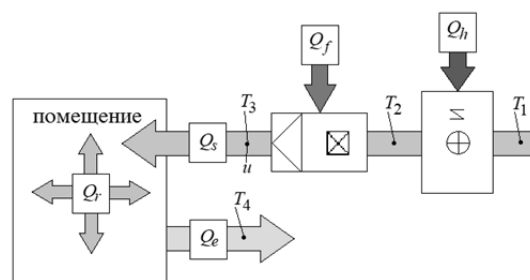


Рис. 1. Схема потоков теплоты в системе «воздухонагреватель–вентилятор–помещение»

Fig. 1. A scheme of heat fluxes in the “heater–fan–room” system

В результате обработки экспериментальных данных по зависимостям (1) были получены изменения значений переходных процессов ОИТ Q_h^r , Q_f^r , Q_r^r и Q_s^r от времени в потоке (рис. 2), проходящем через систему «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» (режим работы вентилятора 0,4, режим работы воздухонагревателя 0,01 → 0,1).

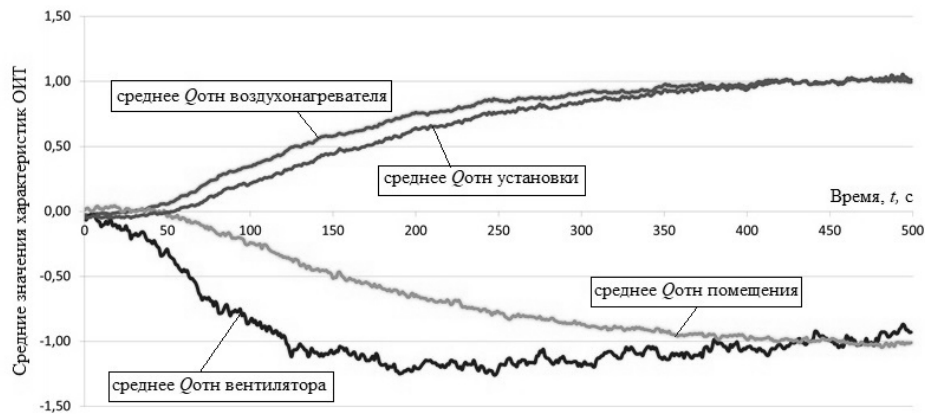


Рис. 2. Экспериментальные зависимости изменения значений ОИТ (1) от времени при разогреве потока

Fig. 2. Relative heat-time observational characteristics in the flux heating mode

На рис. 3 представлена структурная схема теплофизической системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение». Подсистема терморегулирования «воздухонагреватель–вентилятор», называемая выше установкой, является линейной стационарной (это было доказано в ходе проведения экспериментальных исследований) и может быть представлена как последовательное соединение двух более простых, также линейных стационарных подсистем – ВН и ВЕНТ. Процессы, протекающие в контролируемой подсистеме ПОМ, непредсказуемы и носят стохастический характер, поэтому подсистема ПОМ не участвует в общей схеме идентификации. Известная для ПОМ характеристика Q_r^r должна компенсировать влияние установки Q_s^r .

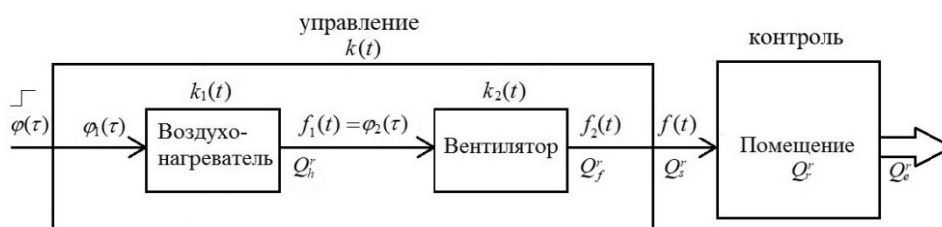


Рис. 3. Схема системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение»

Fig. 3. A scheme of the “heater–fan–room” system

Физические процессы, протекающие в подсистеме терморегулирования и ее подсистемах, сложны для адекватного математического описания. В этом случае можно использовать модель «черного ящика», характеризующегося входным и выходным сигналами, без детализации «внутренностей», а в качестве математической модели в терминах «вход–выход» взять интегральное уравнение Вольтерра первого рода с разностным ядром в виде [4, 5]

$$\int_0^t \varphi_j(t-\tau)k_j(\tau)d\tau = f_j(t), \quad t \in [0, T], \quad (2)$$

где j – номер подсистемы; $k_j(\tau)$ – ИПФ подсистемы (ядро интегрального уравнения); $\varphi_j(\tau)$ – входной сигнал подсистемы; $f_j(t)$ – выходной сигнал подсистемы. На рис. 3 $f_j(t)$ – входной сигнал установки, также являющийся входным сигналом ВН $\varphi_1(\tau)$, представляющий собой скачок производительности на 0.1; $f_1(t) = Q_h^r$ – выходной сигнал ВН, также являющийся входным сигналом ВЕНТ $\varphi_2(\tau)$, работающего в режиме 0.4; $f_2(t) = Q_f^r$ – выходной сигнал ВЕНТ; $f_3(t) = Q_s^r$ – выходной сигнал установки, поступающий на вход подсистемы ПОМ. Сигналы $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ – известные, экспериментально полученные при работе с лабораторной установкой [1] «зашумленные» данные, содержащие погрешности измерений. Сигналы системы строились по $N = 500$ отсчетам эквидистантно с шагом $\Delta t = 1$ с. По результатам экспериментальных исследований было установлено, что время разгона для элементов рассматриваемой установки составляло более 20 с. Такое запаздывание на входное воздействие характерно для инерционных динамических звеньев, то есть реакция такого звена на воздействие происходит не сразу, а через некоторый промежуток времени [6]. Учитывая это обстоятельство, на выходных сигналах регистрировались задержки: на 29 с для $f_1(t)$, на 33 с для $f_2(t)$, на 55 с для $f_3(t)$, которые при моделировании отсекались для нахождения ИПФ линейной части и компенсировались введением в систему звена задержки.

Для моделирования и управления системами с математическими моделями вида (3) необходимо решить задачу непараметрической идентификации – оценить ИПФ как установки $k(\tau)$, так и каждой подсистемы: $k_1(\tau)$ для ВН, $k_2(\tau)$ для ВЕНТ – при скачкообразном изменении производительности на ВН, по измеренным значениям соответствующих входных и выходных параметров потока влажного воздуха. Для построения устойчивого решения поставленной задачи предлагается использовать разработанный в цикле работ [2, 7] алгоритм непараметрической идентификации технических систем, в котором вычисление оценок ИПФ выполняется на основе сглаживающих кубических сплайнов (СКС).

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ

Непараметрическую идентификацию системы терморегулирования и ее составляющих представим в виде следующих этапов.

Этап 1. Вычисление оценки импульсной переходной функции воздухонагревателя. Поскольку на вход ВН в момент времени $t = 0$ подается ступенчатый сигнал $\varphi_1(\tau)$, амплитуда которого постоянна и равна 0.1, то оценить искомую ИПФ $k_1(\tau)$ можно, дифференцируя выходной сигнал $f_1(t)$ при подаче на вход ВН функции Хэвисайда с учетом ее амплитуды 0.1 (коэффициент $K = 0.1$):

$$k_1(t) = \frac{1}{K} \frac{d}{dt} f_1(t), \quad t \in [0, T]. \quad (3)$$

Напомним, что, несмотря на хорошо разработанные алгоритмы численного дифференцирования, на практике снова возникает проблема неустойчивости решения, так как операция дифференцирования является некорректно поставленной задачей [8] и даже небольшой уровень шума регистрации выходного сигнала вызывает очень большие ошибки оценки ИПФ. Для получения устойчивой оценки ИПФ зарегистрированный (с ошибками измерения) сигнал $f_1(t)$ необходимо первоначально сгладить (отфильтровать), а затем применить операцию дифференцирования. Для этих целей будем использовать аппарат СКС с естественными краевыми условиями в силу относительной простоты их построения и наличия соответствующего программного обеспечения в ряде математических пакетов [9, 10].

В отличие от интерполяционного сплайна (ИС), СКС не проходит через заданные точки сигнала, поэтому его используют для фильтрации зашумленных значений. Гладкость СКС, а следовательно, и ошибка фильтрации шума измерения зависят от выбора параметра сглаживания α . Выбор параметра сглаживания α проводился на основе критерия оптимальности [11]. Этот критерий позволяет вычислить оценку α_W для оптимального параметра сглаживания α_{opt} , минимизирующую СКО сглаживания [12], и в дальнейшем предполагается, что СКС строится при $\alpha = \alpha_W$. Вычисление коэффициентов СКС a_i, b_i, c_i, d_i при заданном α подробно изложено в [9].

На рис. 4 представлены оценки ИПФ ВН $\hat{k}_1(t)$, вычисленные по ИС (точечная ломаная) и по СКС (сплошная кривая). На рис. 4 показана эффективность применения СКС с соответствующим выбором параметра сглаживания для устойчивого дифференцирования зашумленных сигналов, поскольку, как можно заметить, дифференцирование по ИС дает неудовлетворительные результаты.

Причинами, по которым ИПФ на рис. 4 (как и на рис. 5 и 6) начинается не с нуля, являются условия проведения этапа натуральных исследований рассматриваемой экспериментальной серии. Режим поддержания заданной производительности ВН осуществлялся симисторным регулятором мощности ТТС-25, синусоидальным сигналом с периодом ≈ 60 с (заводская установка). Экспериментальные исследования проводились сериями из восемнадцати непрерывно следующих друг за другом единичных экспериментов продол-

жительностью 500 с, которые включали последовательное увеличение (нечетные эксперименты) и уменьшение (четные эксперименты) теплопроизводительности ВН исследуемой системы. Затем полученные экспериментальные данные усреднялись по девяти нечетным (нагрев) и девяти четным (охлаждение) экспериментам.

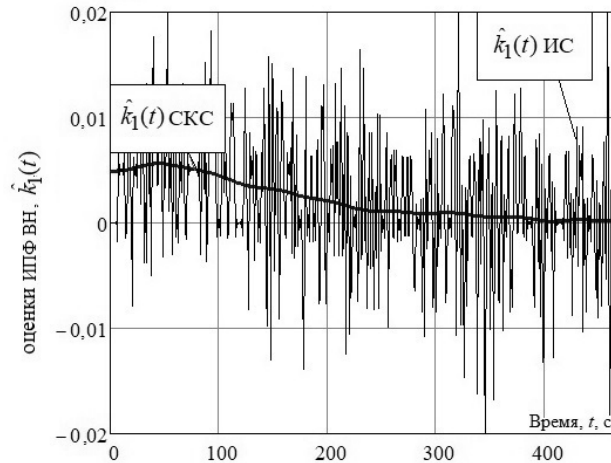


Рис. 4. Оценки ИПФ ВН $\hat{k}_1(t)$

Fig. 4. Impulse response evaluations in the “Heater” object

Найденная оценка $\hat{k}_1(t)$ объекта дает возможность решить прямую задачу – спрогнозировать реакцию потока влажного воздуха $f_1(t)$, проходящего через ВН, на возмущение $\varphi_1(\tau)$ по вычисленной оценке ИПФ $\hat{k}_1(t)$. Для вычисления прогнозных значений $\hat{f}_1(t_j)$, $j=1\dots N$, $N=500$, выходного сигнала $f_1(t)$ ВН используем уравнение

$$\hat{f}_1(t_j) = \int_0^{t_j} \hat{k}_1(t_j - \tau) \varphi_1(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Величина отличия между прогнозными значениями и зарегистрированными значениями $\tilde{f}_1(t_j) = f_1(t_j) + \eta_1(t_j)$, где $\eta_1(t_j)$ – шум измерения, вычислялась по формуле

$$\delta f_1 = \frac{\sum_j |\tilde{f}_1(t_j) - \hat{f}_1(t_j)|}{\sum_j |\hat{f}_1(t_j)|} 100 \%. \quad (5)$$

Величина δf_1 , вычисленная по формуле (5), составила 1.9 %, что говорит о хорошем согласовании вычисленной оценки ИПФ с экспериментальными данными.

Этап 2. Вычисление оценки импульсной переходной функции вентиллятора. При нахождении оценки ИПФ $k_2(\tau)$ входной сигнал уже будет представлен не скачком, а некоторой функцией. Дифференцируя уравнение (2) по переменной t и выполняя несложные преобразования, приходим к интегральному уравнению Вольтерра второго рода:

$$k_2(t) + \frac{1}{\varphi_2(0)} \int_0^t \varphi_2'(t-\tau) k_2(\tau) d\tau = \frac{f_2'(t)}{\varphi_2(0)}, \quad t \in [0, T], \quad (6)$$

решение которого уже является корректно поставленной задачей. Однако и в этом случае также необходимо решить проблемы, во-первых, устойчивого дифференцирования зашумленных входного и выходного сигналов идентифицируемой системы и, во-вторых, вычисления интеграла свертки с наименьшими ошибками интегрирования для уменьшения общей систематической ошибки алгоритма идентификации. Преодолеть эти трудности возможно с применением аппарата СКС, описанного выше.

Для построения оценки ИПФ в этом случае сначала необходимо по значениям соответствующих входного и выходного сигналов объекта построить СКС и вычислить их первые производные [2, 7]. Затем формируется матрица Φ размером $(N-1) \times (N-1)$, элементы которой определяются согласно правилам, изложенным в [7]:

$$\Phi_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{при } i < j, \\ \int_{t_{i-j+1}}^{t_{i-j+2}} S'_{\varphi,\alpha}(\tau) d\tau & \text{при } i \geq j, \end{cases} \quad (7)$$

где $i=1 \dots N$, $j=1 \dots N-1$, $S'_{\varphi,\alpha}(\tau)$ – производная по СКС входного сигнала объекта при заданном параметре сглаживания α_W . Точное и эффективное вычисление значений интеграла свертки в (6) достигается благодаря квадратурной формуле, включающей коэффициенты СКС [7], что уменьшает методическую ошибку алгоритма. Сформированная матрица Φ позволяет аппроксимировать уравнение Вольтера II рода (6) системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида [7]:

$$\left(\mathbf{I} + \frac{1}{S_{\varphi,\alpha}(t_1)} \Phi \right) \hat{\mathbf{k}} = \frac{1}{S_{\varphi,\alpha}(t_1)} \hat{\mathbf{f}}', \quad (8)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица, а вектор $\hat{\mathbf{f}}'$ составлен из значений первой производной по СКС выходного сигнала подсистемы в узлах сетки. Решением системы (8) будет вектор $\hat{\mathbf{k}}$, проекции которого являются оценками для значений $k_2(t_i)$ ИПФ идентифицируемой подсистемы.

На рис. 5 представлены оценки ИПФ ВЕНТ $\hat{k}_2(t)$, вычисленные описанным способом по ИС (тонкая ломаная) и по СКС (жирная кривая). Решение прямой задачи для ВЕНТ заключалось в прогнозировании реакций теплового потока $f_2(t)$ на возмущение $\varphi_2(\tau)$ по вычисленной оценке ИПФ $\hat{k}_2(t)$. Погрешность решения прямой задачи δf_2 (см. формулу (5)) с оценкой $\hat{k}_2(t)$ составила 5 %.

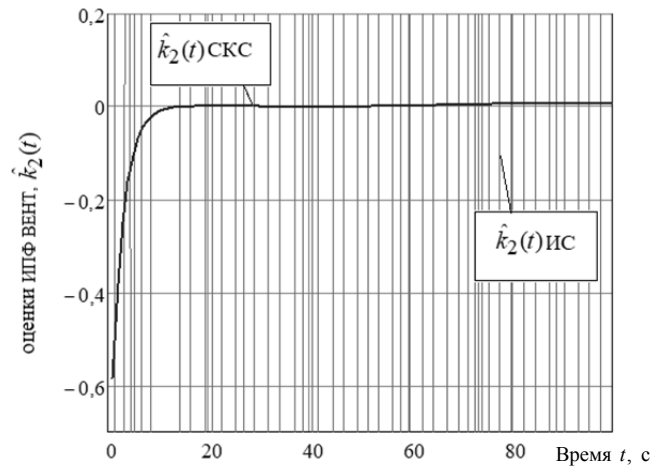


Рис. 5. Оценки ИПФ ВЕНТ $\hat{k}_2(t)$

Fig. 5. Impulse response evaluations in the “Fan” object

Этап 3. Вычисление оценки импульсной переходной функции подсистемы управления. На вход установки в момент времени $t = 0$ подается ступенчатый сигнал $\varphi(\tau)$ (тот же самый, что подавался на изменение теплопроизводительности ВН), амплитуда которого постоянна и равна 0.1. Оценить точность ИПФ установки $k(t)$ можно по тому же самому алгоритму, по которому вычислялась ИПФ $k_1(t)$ на этапе 1. На рис. 6 представлены оценки ИПФ установки $k(t)$, вычисленные по ИС (точечная ломаная) и по СКС (сплошная кривая). Решение прямой задачи относительно установки заключалось в прогнозировании реакции теплового потока подсистемы $f(t)$ на возмущение $\varphi(\tau)$ по вычисленной оценке ИПФ $\hat{k}(t)$. Погрешность решения прямой задачи δf (см. формулу (5)) с оценкой $\hat{k}(t)$ составила 1.6 %.

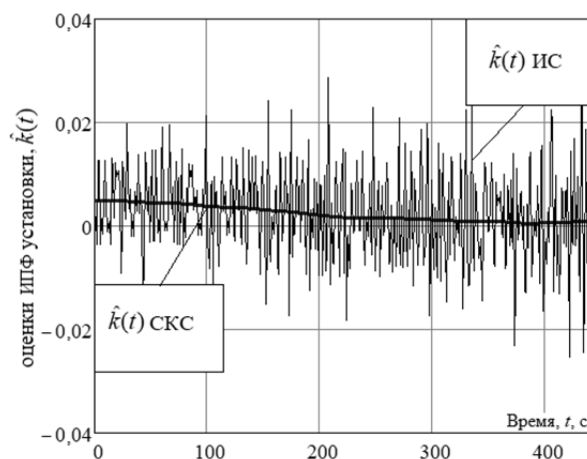


Рис. 6. Оценки ИПФ установки $\hat{k}(t)$

Fig. 6. Impulse response evaluations in the control subsystem

В результате обработки результатов решения прямых задач (уравнение (4)) с соответствующими оценками ИПФ были получены эволюции (рис. 7) значений переходных процессов ОИТ Q_h^r , Q_f^r , Q_r^r и Q_s^r от времени в потоке, проходящем через систему «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» (режим работы вентилятора 0,4, режим работы воздухонагревателя $0,01 \rightarrow 0,1$).

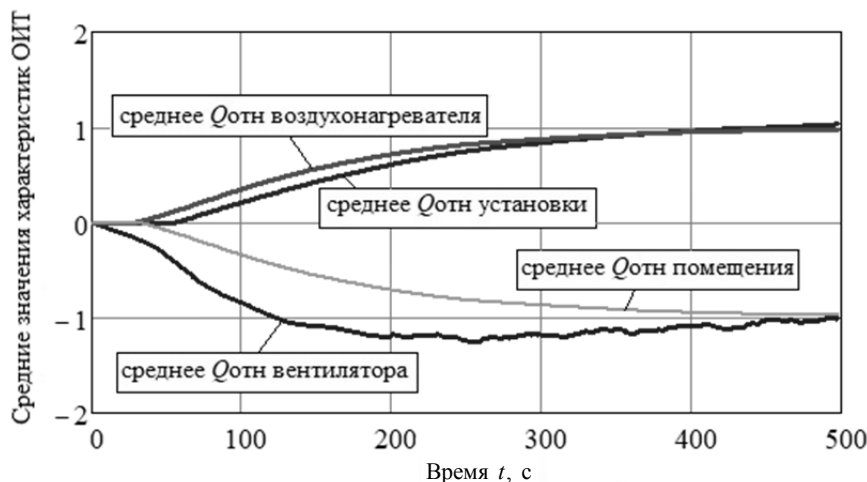


Рис. 7. Теоретические зависимости изменения значений ОИТ от времени при разогреве потока

Fig. 7. Relative heat-time observational characteristics in the flux heating mode

Сравнивая экспериментальные зависимости (см. рис. 2) с расчетными зависимостями (рис. 7), видим их хорошее совпадение, что позволяет сделать вывод об эффективности представленных алгоритмов идентификации при решении задач непараметрической идентификации теплофизических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Непараметрическая идентификация сложных динамических систем является весьма непростой и трудоемкой для практики задач. С одной стороны, это обусловлено некорректностью задачи решения интегрального уравнения первого рода, с другой стороны, разными типами входных и выходных сигналов идентифицируемых систем. Предлагаемый в работе способ решения позволяет в полной мере учитывать специфику поставленной задачи и осуществлять устойчивую непараметрическую идентификацию как всей системы в целом, так и отдельных ее подсистем.

Заметим, что при наличии аномальных измерений входного и выходного сигналов для устойчивой непараметрической идентификации можно использовать робастный алгоритм, предложенный в работе [7].

Успешное решение практической инженерной задачи непараметрической идентификации сложной теплофизической системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» с использованием зашумленных исходных

экспериментальных данных доказывает эффективность применения предлагаемого подхода для непараметрической идентификации других сложных динамических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мансуров Р.Ш., Рудяк В.Я. Переходные процессы в системе нагреватель–вентилятор при изменении режима работы вентилятора // Известия вузов. Строительство. – 2019. – № 3. – С. 50–63. – DOI: 10.32683/0536-1052-2019-723-3-50-63.
2. Воскобойников Ю.Е., Боева В.А. Алгоритмы непараметрической идентификации сложных технических систем // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 4 (80). – С. 47–64. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-47-64.
3. Мансуров Р.Ш., Кувишинов Ю.Я. Интеллектуализация управления системами формирования микроклимата помещений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2012. – № 2. – С. 85–93.
4. Сидоров Д.Н. Методы анализа интегральных динамических моделей: теория и приложения. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 293 с.
5. Greblicki W., Pawiak M. Nonparametric system identification. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 400 p.
6. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем: учебное пособие для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
7. Воскобойников Ю.Е., Боева В.А. Устойчивый алгоритм непараметрической идентификации при наличии аномальных измерений // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 46–53. – DOI: 10.25743/ICT.2020.25.3.006.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 285 с.
9. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 345 с.
10. Wang Y. Smoothing spline: methods and applications. – Chapman and Hall book, 2011. – 370 p. – (Monographs on Statistics and Applied Probability; vol. 121).
11. Lee T.C.M. Smoothing parameter selection for smoothing splines: a simulation study // Computational Statistics and Data Analysis. – 2006. – Vol. 42 (1–2). – P. 139–148. – DOI: 10.1016/S0167-9473(06)00159-7.
12. Балк П.И., Долгаль А.С. Сплайн-сглаживание экспериментальных данных при нулевом медианном значении помех // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 6. – С. 138–156. – DOI: 10.1134/S000511791706008X.

Боева Василиса Андреевна, выпускница кафедры автоматки Новосибирского государственного технического университета (НЭТИ), аспирант Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) по профилю «Системный анализ, управление и обработка информации», ассистент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета. Основное направление научных исследований – методы и алгоритмы непараметрической идентификации реальных технических систем. Является автором более 20 научных статей. E-mail: v.boyeva@sibstrin.ru.

Воскобойников Юрий Евгеньевич, выпускник кафедры автоматки Новосибирского государственного технического университета (НЭТИ), доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), профессор кафедры автоматки Новосибирского государственного технического университета. Заслуженный работник Высшей школы РФ. Основное направление научных исследований – методы и алгоритмы

мы решения некорректных задач интерпретации экспериментальных данных; методы и алгоритмы фильтрации сигналов и изображений. Является автором более 320 научных работ, в том числе шести научных монографий по решению некорректно поставленных задач. E-mail: voscob@mail.ru.

Мансуров Рустам Шамильевич, выпускник кафедры теплогаснабжения и вентиляции Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), кандидат технических наук, заведующий кафедрой теплогаснабжения и вентиляции Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), почетный работник высшего профессионального образования РФ, советник РААСН. Основное направление научных исследований – разработка научно-технических основ интеллектуального управления оптимизацией энергопотребления системами обеспечения микроклимата. Является автором более 80 научных работ. E-mail: rmansurov@inbox.ru.

Boeva Vasilisa A., postgraduate student specializing in system analysis, control and data interpretation and teaching assistant, Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin). Her research interests are currently focused on non-parametric identification methods and algorithms for real engineering systems. She has 18 scientific articles. E-mail: v.bojeva@sibstrin.ru.

Voskoboinikov Yuri E., graduate of the Department of Automation of NSTU (NETI), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Department of Applied Mathematics of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Professor at the Department of Automation of the Novosibirsk State Technical University, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation. The main field of his scientific research is methods and algorithms for solving ill-posed problems of interpreting experimental data; methods and algorithms for filtering signals and images. He is the author of over 280 scientific papers, including 5 scientific monographs on solving ill-posed problems. E-mail: voscob@mail.ru.

Mansurov Rustam S., graduate of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation of Novosibirsk State University of Architecture (Sibstrin), PhD (Eng.), Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin). Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation. He is an advisor to the RAASN. The main field of his scientific research is the development of scientific and technical foundations for intelligent control of energy consumption optimization by microclimate systems. He is the author of over 80 scientific papers. E-mail: rmansurov@inbox.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-7-20

Non-parametric identification of thermal control system elements*

V. BOEVA^{1,a}, YU. VOSKOBAINIKOV^{1,2,b}, R. MANSUROV^{1,c}

¹ Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113 Lenin-gradskaja Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation

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

^a v.bojeva@sibstrin.ru ^b voscob@mail.ru ^c rmansurov@inbox.ru

Abstract

The thermal control system “Heater-Fan-Room” is represented by three different-type interconnected simpler subsystems. In this paper, a “black-box” whose structure is not specified is used as a mathematical model of the system and subsystems due to complexity of physical

* Received 12 October 2020.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90041.

processes proceeding in these subsystems. For stationary linear systems, the connection between an input and an output of the “black-box” is defined by the Volterra integral equation of the first kind with an undetermined difference kernel also known as impulse response in the automatic control theory. In such a case, it is necessary to evaluate an unknown impulse response to use the “black-box” model and formulate all subsystems and the system as a whole. This condition complicates significantly the solution search of non-parametric identification problems in the system because an output of one subsystem is an input of another subsystem, so active identification schemes are unappropriated. Formally, an impulse response evaluation is a solution of the integral equation of the first kind for its kernel by registered noise-contaminated discrete input and output values. This problem is ill-posed because of the possible solution instability (impulse response evaluation in this case) relative to measurement noises in initial data. To find a unique stable solution regularizing algorithms are used, but the specificity of the impulse response identification experiment in the “Heater-Fan-Room” system do not allow applying computational methods of these algorithms (a system of linear equations or discrete Fourier transformation). In this paper, the authors propose two specific identification algorithms for complex technical systems. In these algorithms, impulse responses are evaluated using first derivatives of identified system signals that are stably calculated by smoothing cubic splines with an original smoothing parameter algorithm. The results of the complex “Heater-Fan-Room” system modeling and identification prove the efficiency of the algorithms proposed.

Keywords: thermal control system, “black box” model, nonparametric identification problem, ill-posed problems, Voltaire integral equation of the first kind, stable identification algorithms, transient process, climatic system, relative excess heat

REFERENCES

1. Mansurov R.Sh., Rudyak V.Ya. Perekhodnye protsessy v sisteme nagrevatel'–ventilyator pri izmenenii rezhima raboty ventilyatora [Transients processes in the system the heater-fan when changing the operating mode of the fan]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = News of higher educational institutions. Construction*, 2019, no. 3, pp. 50–63. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-723-3-50-63. (In Russian).
2. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Algoritmy neparametricheskoi identifikatsii slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Non-parametric identification algorithms for complex technical systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (80), pp. 47–64. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-47-64.
3. Mansurov R.Sh., Kuvshinov Yu.Ja. *Intellektualizatsiya upravleniya sistemami formirovaniya mikroklimata pomeshchenij* [The intellectual system development of room microclimate formation]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN = News of the Kabardin-Balkar scientific center of RAS*, 2012, no. 2, pp. 85–93.
4. Sidorov D.N. *Metody analiza integral'nykh dinamicheskikh modelei: teoriya i prilozheniya* [Analysis methods of integral dynamic models: theory and application]. Irkutsk, ISU Publ., 2013. 293 p.
5. Greblicki W., Pawiak M. *Nonparametric system identification*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 400 p.
6. Nikulin E.A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chastotnye metody analiza i sinteza sistem* [Bases of automation control theory. Frequency methods of system analysis and synthesis]. St. Petersburg, BVH-Peterburg Publ., 2004. 640 p.
7. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Ustoichivyi algoritm neparametricheskoi identifikatsii pri nalichii anomal'nykh izmerenii [Stable algorithm of nonparametric identification in case of anomalous measurements]. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 46–53. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.3.006.
8. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods of ill-posed problems solution]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 285 p.
9. Zav'yalov Yu.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L. *Metody splain-funktsii* [Methods of splines]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 345 p.

10. Wang Y. *Smoothing splines: methods and applications*. Chapman and Hall book, 2011. 370 p.

11. Lee T.C.M. Smoothing parameter selection for smoothing splines : a simulation study / *Computational Statistics and Data Analysis*, 2006, no. 42 (1–2), pp. 139–148. DOI: 10.1016/S0167-9473(06)00159-7.

12. Balk P.I., Dolgal' A.S. Spline smoothing for experimental data under zero median of the noise. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, no. 6, pp. 1072–1086. DOI: 10.1134/S000511791706008X. Translated from *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 6, pp. 138–156.

Для цитирования:

Боева В.А., Воскобойников Ю.Е., Мансуров Р.Ш. Непараметрическая идентификация элементов системы терморегулирования // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-7-20.

For citation:

Boeva V.A., Voskoboynikov Yu.E, Mansurov R.Sh. Neparametricheskaya identifikatsiya elementov sistemy termoregulirovaniya [Non-parametric identification of thermal control system elements]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 7–20. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-7-20.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.5.013

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-21-38

Полиномиальное матричное разложение при синтезе неквадратных САУ*

А.А. ВОЕВОДА^а, В.Ю. ФИЛЮШОВ^б

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

^а ucit@ucit.ru ^б filiushov.vladislav@gmail.com

Рост сложности объектов управления вынуждает использовать всё более продвинутые методы синтеза. Относительно простые объекты представляются в виде одноканальной системы или в виде комбинации таковых и рассчитываются отдельно. Более сложные системы необходимо рассматривать как многосвязные. Для этого существует несколько подходов. В рамках настоящей работы рассмотрим синтез системы, представленной в виде полиномиального матричного разложения. Оно позволяет записать замкнутую систему в таком виде, что по аналогии с одноканальными системами удается выделить «числитель» и «знаменатель» не только объекта и регулятора, но и всей системы. Для многоканальных объектов они запишутся в матричном виде, позволяя выделить характеристическую матрицу, определитель которой является характеристическим полиномом.

В работе рассматривается вывод четырех вариантов полиномиально матричного разложения (ПМР) замкнутой системы. Такая разнообразность представления замкнутой системы вытекает из эквивалентной записи передаточной матрицы в виде левого и правого ПМР объекта или регулятора. Из четырех вариантов записи системы выделены два варианта характеристической матрицы – левая и правая. При преобразовании их к диагональному виду элементы, стоящие на главной диагонали, содержат в себе полюса замкнутой системы по соответствующему каналу. Из приведенного в конце статьи примера видно, что для неквадратного объекта (количество входных и выходных величин не равно, non-square object) с количеством входных воздействий, превышающим количество выходных величин, удобнее использовать левую характеристическую матрицу потому, что она имеет меньшую размерность. Правая характеристическая матрица также может быть применена для синтеза такого объекта управления, но полученное решение более сложное и неочевидное. Ситуация меняется на противоположную, если рассматривать объект с количеством входов меньшим, чем количество выходов. В таком случае правая характеристическая матрица будет меньшего размера и более подходящей для синтеза. Из этого следует вывод, что процедура синтеза системы управления для неквадратных объектов отличается в зависимости от количества входов и выходов.

* Статья получена 23 октября 2020 г.

Ключевые слова: многоканальный, многосвязный, неквадратный, полиномиальное матричное разложение, характеристическая матрица, синтез, матрица Сильвестра, диофантово уравнение

ВВЕДЕНИЕ

Синтез систем управления в пространстве состояний впервые появился в 1960-х и до 1980-х отмечен в большинстве книг по управлению. Применение описания системы в пространстве состояний позволило систематизировать изучение многоканальных систем (MIMO – multi input multi output) управления. Основные идеи такого описания: наблюдаемость и управляемость системы, переход к каноническим видам, расчет регулятора в обратной связи и вычисление недостающих элементов вектора состояния при помощи наблюдателя состояния.

Альтернативным подходом синтеза многоканальных систем, который был предложен в 1970-х годах, является описание через полиномиальные матрицы [1–4] или дифференциальные операторы. Так же как и описание системы в пространстве состояний, полиномиальное матричное описание позволяет представлять многоканальные объекты в удобном для синтеза виде, поэтому синтез системы управления, не отличаясь сложностью, имеет ряд преимуществ.

Многоканальные линейные объекты разделяют на несколько видов. В зависимости от соотношения количества входных воздействий и выходных величин они могут быть *квадратными* (*square*) и *неквадратными* (*non-square*). Синтез систем в полиномиальном матричном представлении для квадратных объектов хорошо описан в работах [5–7]. В [8] решена задача поиска регулятора пониженного порядка путем дифференцирования характеристического полинома. Такой подход позволяет уменьшить порядок рассчитываемого регулятора, но при этом вводятся некоторые ограничения на полученную динамику процессов. В [9] описан модальный метод синтеза для объектов в полиномиальном матричном разложении. В работе [10] найдено решение для регулятора повышенного порядка, где полученные при повышении порядка системы свободные параметры используются для достижения дополнительных качественных характеристик системы.

Множество объектов управления имеют неквадратную структуру. Синтез системы управления для таких объектов представляется более интересной задачей. Перевернутый маятник [11], являясь неустойчивым и не минимально фазовым объектом, выступает ярким примером неквадратной системы, имеющей одно входное воздействие (приложенная к основанию сила) и две выходные величины (угол отклонения маятника и положение каретки). Синтез такой системы различными методами представлен в работах [12–16], также расчет регулятора пониженного порядка для двойного перевернутого маятника представлен в работе [17]. Для повышения качества стабилизации перевернутый маятник можно представить в виде нелинейного объекта управления. В таком случае применима *линеаризация по обратной связи* [18–20] (*linearization by output injection*). Синтез такой модели представлен в работах [21–24]. Линейная модель бокового движения высокоманевренного летательного аппарата на больших углах атаки [25]

является неквадратным объектом, где угол скольжения, угловая скорость крена, угловая скорость рыскания и угол крена являются выходными величинами, а угол отклонения элеронов и угол отклонения руля направления – входными. Разработку алгоритмов синтеза для такого рода объектов можно найти в работах [25–28].

В рамках настоящей работы постараемся показать некоторые основные понятия, необходимые для полиномиального синтеза не квадратных объектов, а именно вывод четырех вариантов разложения замкнутой системы объект–регулятор. Для случая, где входов больше, чем выходов, в работе рассчитан регулятор [29] для правого полиномиального разложения. В работах [30, 31] рассчитан регулятор для объекта с одним входом и двумя выходами.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

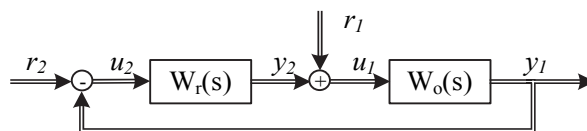
Синтез системы управления выполним заданием желаемых полюсов замкнутой системы для объекта с *матричной передаточной функцией* (далее МПФ) $W_o(s) \in R(s)^{p \times m}$, имеющего $u_1(s) \in R^m(s)$ входных воздействий и $y_1(s) \in R^p(s)$ выходных величин, который записывается *полиномиальным матричным разложением* (*polynomial matrix description*), далее ПМР, в следующем виде:

$$W_o(s) = N(s)D^{-1}(s) = \tilde{D}^{-1}(s)\tilde{N}(s), \quad (1)$$

где $D(s) \in R[s]^{m \times m}$, $\tilde{D}(s) \in R[s]^{p \times p}$, $N(s), \tilde{N}(s) \in R[s]^{p \times m}$. Система управления состоит из регулятора $W_r(s) \in R[s]^{m \times p}$, стоящего в прямой связи и имеющего следующее ПМР:

$$W_r(s) = X(s)Y^{-1}(s) = \tilde{Y}^{-1}(s)\tilde{X}(s),$$

где $Y(s) \in R[s]^{p \times p}$, $\tilde{Y}(s) \in R[s]^{m \times m}$, $X(s), \tilde{X}(s) \in R[s]^{m \times p}$, а также имеющего $u_2(s) \in R(s)^p$ и $y_2(s) \in R(s)^m$. На рисунке представлена структурная схема системы.



Структурная схема «объект–регулятор»

An object-regulator structural scheme

Передаточная матрица имеет левое или правое ПМР. Таким образом, имея одну передаточную матрицу объекта и одну – регулятора, можно получить четыре варианта записи замкнутой системы. Ниже представлена теорема

[1, с. 301], которая служит для выбора порядка регулятора, а также описывает характеристическую матрицу замкнутой системы (далее ХМЗС) и передаточную матрицу замкнутой системы.

Теорема. Объект описан строго правильной рациональной матрицей $W(s)$ размером $p \times m$. Пусть $W(s)$ разложена на $W(s) = \tilde{D}^{-1}(s)\tilde{N}(s)$, где $\tilde{D}(s)$, $\tilde{N}(s)$ – взаимно простые слева и $\tilde{D}(s)$ – строчно правильная со степенями строк v_i , $i=1\dots p$. Пусть μ – столбцовый индекс $W(s)$ и пусть $m_i \geq \mu - 1$. Тогда для любой строчно и столбцово правильной полиномиальной матрицы $C(s)$ размером $p \times p$ такой, что

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \text{diag}(s^{-v_1}, s^{-v_2}, \dots, s^{-v_p})C(s)\text{diag}(s^{-m_1}, s^{-m_2}, \dots, s^{-m_p}) = C_h$$

– несингулярная числовая матрица, существует такой правильный регулятор $W_r(s) = X(s)Y^{-1}(s)$, где $Y(s)$ – столбцово правильная со степенями столбцов m_i такая, что

$$\tilde{D}(s)Y(s) + \tilde{N}(s)X(s) = \tilde{C}(s), \quad (2)$$

и передаточная матрица вход системы выход объекта следующая:

$$W_{cl}(s) = I - Y(s)\tilde{C}^{-1}(s)\tilde{D}(s). \quad (3)$$

Уравнение (3) описывает передаточную матрицу замкнутой системы с левой характеристической матрицей (2). Определитель характеристической матрицы $\det \tilde{C}(s)$ является характеристическим полиномом замкнутой системы. В данной теореме приведено решение для объекта в левом полиномиально матричном представлении и регулятора – в правом.

2. ВАРИАНТЫ ПОЛИНОМИАЛЬНО МАТРИЧНОГО ОПИСАНИЯ СИСТЕМЫ

Существуют и другие варианты представления, которые рассмотрены в работе [4]. Ниже представим вывод четырех вариантов разложения и покажем, что они эквивалентны.

Введем дополнительные переменные $z_{1,2}(s)$ и $\tilde{z}_{1,2}(s)$, тогда уравнения объекта и регулятора можно записать в следующих четырех вариантах:

$$D(s)z_1(s) = u_1(s), \quad y_1(s) = N(s)z_1(s), \quad (4)$$

или

$$\tilde{D}(s)\tilde{z}_1(s) = \tilde{N}(s)u_1(s), \quad y_1(s) = \tilde{z}_1(s), \quad (5)$$

и регулятора:

$$Y(s)z_2(s) = u_2(s), \quad y_2(s) = X(s)z_2(s), \quad (6)$$

или

$$\tilde{Y}(s)\tilde{z}_2(s) = \tilde{X}(s)u_2(s), \quad y_2(s) = \tilde{z}_2(s), \quad (7)$$

где $z_1(s), u_1(s), y_2(s) \in R^m(s)$ и $z_2(s), u_2(s), y_1(s) \in R^p(s)$. Стоит заметить, что $(\tilde{D}(s), \tilde{N}(s))$ и $(\tilde{Y}(s), \tilde{X}(s))$ должны быть взаимно простыми слева, а $(D(s), N(s))$ и $(Y(s), X(s))$ – взаимно простыми справа.

По рис. 1 выпишем уравнения входов объекта и регулятора

$$u_1(s) = r_1(s) + y_2(s), \quad u_2(s) = r_2(s) - y_1(s), \quad (8)$$

где $r_1(s) \in R^m(s)$, $r_2(s) \in R^p(s)$. Дополнительные выходы и входы $u_1(s)$, $u_2(s)$ и $v_1(s)$ позволяют представить уравнения замкнутой системы в виде блочных матриц, что упрощает анализ и дает дополнительные возможности для синтеза.

3. ВЫВОД УРАВНЕНИЙ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

Покажем эквивалентность записи объекта и регулятора в различных полиномиальных разложениях, для этого рассмотрим вывод четырех разложений системы управления. Далее для компактности будем писать аргументы у функций только в случае неоднозначности описания, в остальных случаях опустим.

1. Правое полиномиально матричное разложение объекта (4) и левое разложение регулятора (7). В уравнение (8) вместо y_1 и y_2 подставим их из (4) и (7) и получим $u_1 = r_1 + \tilde{z}_2$, $u_2 = r_2 - Nz_1$. Далее, подставив полученные уравнения входных воздействий в (4) и (7), соответственно получим $Dz_1 = r_1 + \tilde{z}_2$, $\tilde{Y}\tilde{z}_2 = \tilde{X}(r_2 - Nz_1)$, перегруппируем, тогда $Dz_1 - \tilde{z}_2 = r_1$, $\tilde{Y}\tilde{z}_2 + \tilde{X}Nz_1 = \tilde{X}r_2$, или в виде блочных матриц

$$\begin{pmatrix} D & -I \\ \tilde{X}N & \tilde{Y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ \tilde{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & \tilde{X} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ \tilde{z}_2 \end{pmatrix}.$$

Также можно вывести следующую запись замкнутой системы. Возьмем уравнение (4) $Dz_1 = u_1$, подставим u_1 из уравнения (8): $Dz_1 = r_1 + y_2$, далее вместо y_2 подставим разложение регулятора $Dz_1 = r_1 + \tilde{Y}^{-1}\tilde{X}u_2$, затем из уравнения (8) – значение u_2 , тогда $Dz_1 = r_1 + \tilde{Y}^{-1}\tilde{X}(r_2 - y_1)$, после этого подставим из уравнения (4) $y_1 = Nz_1$ и получим

$$Dz_1 = r_1 + \tilde{Y}^{-1}\tilde{X}(r_2 - Nz_1) \rightarrow (\tilde{Y}D + \tilde{X}N)z_1 = \begin{pmatrix} \tilde{Y} & \tilde{X} \\ & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix},$$

при этом $y_1 = Nz_1$, $u_1 - r_1 = y_2 \rightarrow Dz_1 - r_1 = y_2$, или

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N \\ D \end{pmatrix} z_1 + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -I & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}.$$

Подставив ранее полученный z_1 , получим следующую запись замкнутой системы левого разложения регулятора и правого разложения объекта:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} N \\ D \end{bmatrix} (\tilde{Y}D + \tilde{X}N)^{-1} (\tilde{Y} \quad \tilde{X}) + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -I & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

При рассмотрении задания r_2 и выходной величины y_1 получим следующую замкнутую систему:

$$y_1 = N(\tilde{Y}D + \tilde{X}N)^{-1} \tilde{X}r_2, \quad (10)$$

или $y_1 = NC^{-1} \tilde{X}r_2$, где

$$C = \tilde{Y}D + \tilde{X}N. \quad (11)$$

Уравнение (11) представляет собой правую характеристическую матрицу системы, представленной на рис. 1.

2. Левое ПМР объекта (5) и правое – регулятора (6). Выполним аналогичные операции, как для первого случая, тогда получим записи, аналогичные уравнениям (9), (10), (11):

$$\begin{pmatrix} D & -\tilde{N}X \\ I & Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{z}_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{N} & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{z}_1 \\ z_2 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -Y \\ X \end{bmatrix} (\tilde{D}Y + \tilde{N}X)^{-1} (-\tilde{N} \quad \tilde{D}) + \begin{pmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}.$$

Выпишем необходимую для синтеза передаточную матрицу выхода y_1 от входа r_2 :

$$y_1 = (I - Y(\tilde{D}Y + \tilde{N}X)^{-1} \tilde{D})r_2. \quad (12)$$

Распишем уравнение (12) $y_1 = r_2 - Y(\tilde{D}Y + \tilde{N}X)^{-1} \tilde{D}r_2$ и выполним замену переменной: $\hat{y}_1 = r_2 - y_1$, тогда $\hat{y}_1 = Y(\tilde{D}Y + \tilde{N}X)^{-1} \tilde{D}r_2$, или $\hat{y}_1 = Y\tilde{C}^{-1} \tilde{D}r_2$, где

$$\tilde{C} = \tilde{D}Y + \tilde{N}X. \quad (13)$$

Полюса систем (10) и (12) одинаковы, что говорит о том, что если система (10) устойчива, то и система (12) будет устойчива. Полученная левая характеристическая матрица (13) и уравнение (2) из теоремы одинаковы.

3. Левое ПМР объекта (5) и регулятора (7). Подставим в уравнение (8) значения выходов y_1, y_2 из уравнения (5) и (7), а затем полученное выражение подставим в уравнения входов u_1, u_2 (5) и (7), получим следующую запись:

$$\begin{pmatrix} \tilde{D} & -\tilde{N} \\ \tilde{X} & \tilde{Y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{N} & 0 \\ 0 & \tilde{X} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \end{pmatrix}.$$

4. Правое ПМР объекта (4) и регулятора (7). Подставим в уравнение (8) значения выходов y_1, y_2 из уравнения (4) и (7), а затем полученное выражение подставим в уравнения входов u_1, u_2 (4) и (7), получим следующую запись:

$$\begin{pmatrix} D & -X \\ N & Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} N & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}.$$

Уравнения (11) и (13) описывают характеристическую матрицу замкнутой системы, которая используется в дальнейшем для задания желаемых полюсов замкнутой системы, причем по каналу каждого управления возможно задавать собственные полюса.

4. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ ПОЛИНОМ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

Характеристическая матрица для эквивалентных взаимно простых полиномиально матричных описаний системы различна, но ее определитель, т. е. характеристический полином, инвариантен к выбору разложения. Покажем, что ХМЗС замкнутых систем одинаковы, для этого перепишем их в виде уравнения вход–выход:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{D} & -\tilde{N}X \\ I & Y \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{N} & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D & -I \\ \tilde{X}N & \tilde{Y} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & \tilde{X} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{D} & -\tilde{N} \\ \tilde{X} & \tilde{Y} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{N} & 0 \\ 0 & \tilde{X} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D & -X \\ N & Y \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Эти передаточные матрицы, описывающие одну и ту же систему, эквивалентны при условии, что объект и регулятор взаимно простые. Тогда характеристические полиномы будут иметь одинаковые корни:

$$\det \begin{pmatrix} \tilde{D} & -\tilde{N}X \\ I & Y \end{pmatrix} \sim \det \begin{pmatrix} D & -I \\ \tilde{X}N & \tilde{Y} \end{pmatrix} \sim \det \begin{pmatrix} \tilde{D} & -\tilde{N} \\ \tilde{X} & \tilde{Y} \end{pmatrix} \sim \det \begin{pmatrix} D & -X \\ N & Y \end{pmatrix}.$$

Покажем это, воспользовавшись формулой преобразования определителя блочной матрицы [32], которая записывается в следующем виде:

$$\det \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \det A \det (D - CA^{-1}B) = \det (A - BD^{-1}C) \det D.$$

Рассмотрим случаи левого ПМР объекта и правого ПМР регулятора (14):

$$\det \begin{pmatrix} \tilde{D} & -\tilde{N}X \\ I & Y \end{pmatrix} = \det \tilde{D} \det (Y + \tilde{D}^{-1}\tilde{N}X) = \det (\tilde{D}Y + \tilde{N}X) = \det \tilde{C},$$

или правое ПМР объекта и левое ПМР регулятора (15):

$$\det \begin{pmatrix} D & -I \\ \tilde{X}N & \tilde{Y} \end{pmatrix} = \det D \det (\tilde{Y} + \tilde{X}ND^{-1}) = \det (\tilde{Y}D + \tilde{X}N) = \det C.$$

Рассмотрим случаи левого ПМР объекта и левого ПМР регулятора (16):

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} \tilde{D} & -\tilde{N} \\ \tilde{X} & \tilde{Y} \end{pmatrix} &= \det \tilde{D} \det (\tilde{Y} + \tilde{X}\tilde{D}^{-1}\tilde{N}) = \det (\tilde{Y} + \tilde{X}ND^{-1}) \det \tilde{D} = \\ &= \det (\tilde{Y}D + \tilde{X}N) \det D^{-1} \det \tilde{D}. \end{aligned}$$

Так как $\det(D) = \alpha \det(\tilde{D})$, то $\det \begin{pmatrix} \tilde{D} & -\tilde{N} \\ \tilde{X} & \tilde{Y} \end{pmatrix} = \alpha \det(\tilde{Y}D + \tilde{X}N) = \alpha C$, где α – константа. Далее найдем аналогично для правого ПМР объекта и регулятора (17):

$$\det \begin{pmatrix} D & -X \\ N & Y \end{pmatrix} = \det D \det (Y + ND^{-1}X) = \det D \det \tilde{D}^{-1} \det (Y\tilde{D} + \tilde{N}X),$$

или $\alpha \det(Y\tilde{D} + \tilde{N}X) = \alpha \tilde{C}$. Таким образом, в свернутом виде полюса системы можно задавать с помощью двух матричных уравнений $C \in R[s]^{m \times m}$ и $\tilde{C} \in R[s]^{p \times p}$, описываемых выражениями (11) и (13).

5. ПРИМЕР СИНТЕЗА

На примере неустойчивого и не строго правильного объекта $W(s) \in R(s)^{p \times m}$ с передаточной матрицей

$$W(s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{s-1} & 1 & \frac{1}{s-2} \\ 1 & \frac{1}{s-3} & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

покажем возможность синтеза неквадратной САУ через найденные уравнения характеристических матриц (11) и (13). На первом этапе рассчитаем регулятор от левого полиномиального матричного разложения объекта, а на втором – от правого.

Левое взаимно простое и строчно правильное ПМР передаточной матрицы (18) имеет следующий вид:

$$\tilde{D}(s) = \begin{pmatrix} (s-1)(s-2) & 0 \\ 0 & s-3 \end{pmatrix}, \quad \tilde{N}(s) = \begin{pmatrix} s-2 & (s-1)(s-2) & s-1 \\ s-3 & 1 & s-3 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где в соответствии с (1) $m=3$, $p=2$. При помощи *двойного взаимно простого разложения (doubly coprime factorization)* [33] найдено взаимно простое и столбцово приведенное правое ПМР объекта от левого (19), которое имеет следующий вид:

$$D(s) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & s-1 \\ 0 & s-3 & 0 \\ s-2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad N(s) = \begin{pmatrix} 1 & s-3 & 1 \\ s-2 & 1 & s-1 \end{pmatrix}.$$

Из вида правого ПМР видно, что столбцовый индекс [2] равен $\mu=1$, тогда из условий **теоремы** минимальная степень регулятора равна $m_{1,2} \geq \mu - 1 = 0$.

Синтез для левого полиномиального матричного разложения объекта произведем, используя характеристическую матрицу (13), затем перейдем от левого ПМР объекта к правому и от правого ПМР регулятора – к левому. Полученные разложения подставим в характеристическую матрицу (11) и сравним полученные результаты. Расчеты приведены в сокращенном виде.

Уравнения характеристических матриц (11) и (13) являются разновидностью диофантового уравнения, решение которого возможно различными способами. В нашем случае была применена матрица Сильвестра [10], где неизвестные и известные коэффициенты уравнения записаны в выражении $\tilde{\mathfrak{R}}\tilde{\mathfrak{S}} = \tilde{\mathfrak{S}}_d$, где $\tilde{\mathfrak{R}}$ – числовая матрица неизвестных коэффициентов регулятора, $\tilde{\mathfrak{S}}$ – числовая матрица Сильвестра, составленная из коэффициентов объекта, и $\tilde{\mathfrak{S}}_d$ – желаемая числовая характеристическая матрица коэффициентов. В общем случае $\tilde{\mathfrak{S}}$ не квадратная, и для единственного решения необ-

ходимо линейно зависимые строки, содержащие свободные параметры, перенести в матрицу $\tilde{\mathfrak{K}}_d$. Таким образом получим решение вида

$$\tilde{\mathfrak{R}} = \tilde{\mathfrak{K}}_d \tilde{\mathfrak{S}}^{-1}, \quad (20)$$

где матрица Сильвестра $\tilde{\mathfrak{S}}$ квадратная и имеет полный ранг. Зададим для передаточной матрицы объекта (18) характеристическую матрицу (13) вида $\tilde{C}^*(s) = \text{diag}(s^2 + 2s + 1, s + 1)$, тогда правое ПМР регулятора при $\tilde{C}(s) = \tilde{C}^*(s)$ следующее:

$$Y(s) = \begin{pmatrix} 1 & -4 \\ -5 & 1 \end{pmatrix}, \quad X(s) = \begin{pmatrix} -4 & 0 \\ 0 & 4 \\ 9 & 0 \end{pmatrix}, \quad W_r(s) = \frac{1}{19} \begin{pmatrix} 4 & 16 \\ -20 & -4 \\ -9 & -36 \end{pmatrix}.$$

При помощи двойного взаимно простого разложения перейдем от правого ПМР регулятора к левому, тогда

$$\tilde{X}(s) = \begin{pmatrix} -4 & 0 \\ 20 & 4 \\ 9 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{Y}(s) = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 0 \\ 0 & -19 & 0 \\ 0 & -9 & 1 \end{pmatrix}.$$

Передаточная матрица замкнутой системы $y_1 = W_{cl}r_2$, одинаковая для (14), (15), (16), (17), и правая характеристическая матрица, полученная подстановкой левого ПМР регулятора и правого ПМР объекта в уравнение (11), равны

$$W_{cl}(s) = \begin{pmatrix} \frac{5s-1}{(s+1)^2} & \frac{4s-12}{s+1} \\ \frac{5s^2-15s+10}{(s+1)^2} & \frac{4}{s+1} \end{pmatrix}, \quad C(s) = \begin{pmatrix} -4 & 0 & s-5 \\ -(s+3) & \frac{-1}{4}(s+1) & -(s+4) \\ s+7 & 0 & 9 \end{pmatrix}.$$

Нулевой порядок регулятора (П-регулятор) обеспечивает необходимые полюса замкнутой системы, при этом получены следующие установившиеся значения: $W_{cl}(0) = (-1 \ -12; \ 10 \ 4)$. Для достижения заданных значений в установившемся режиме необходимо повысить порядок регулятора и поставить интегратор после регулятора, тогда $\tilde{C}^*(s) = \text{diag}(s^3 + 3s^2 + 3s + 1, s^2 + 2s + 1)$, а регулятор, выполняющий $\tilde{C}(s) = \tilde{C}^*(s)$, следующий:

$$Y = -\frac{s}{5} \begin{pmatrix} 2 & 27 \\ 51 & -4 \end{pmatrix}, \quad X = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} -40 & 0 \\ 7s-21 & 27s-1 \\ 51s+33 & s-2 \end{pmatrix}, \quad W_r = \begin{pmatrix} \frac{32}{277s} & \frac{216}{277s} \\ \frac{27-281s}{277s} & \frac{113-27s}{277s} \\ \frac{-5s-6}{277s} & \frac{-(275s+179)}{277s} \end{pmatrix},$$

а его левое полиномиальное матричное разложение

$$\tilde{Y}(s) = \frac{1}{277} \begin{pmatrix} -277 & -1869.75 \\ 108 - 1124s & 452 - 108s \\ 511 & -221 \end{pmatrix}, \quad \tilde{X}(s) = \frac{1}{32} \begin{pmatrix} -277s & 0 & 0 \\ 0 & 128s & 0 \\ 60 & -64 & 32 \end{pmatrix}.$$

Ниже не будет приведена правая характеристическая матрица $C(s)$ из-за ее сложной и не подходящей для понимания структуры. Матричная передаточная функция замкнутой системы с регулятором первого порядка следующая:

$$W_{cl}(s) = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} \frac{7s^3 + 9s^2 + 19s + 5}{(s+1)^3} & \frac{27s(s-3)}{(s+1)^2} \\ \frac{51s(s^2 - 3s + 2)}{(s+1)^3} & \frac{s^2 + 22s + 5}{(s+1)^2} \end{pmatrix}.$$

Первый порядок регулятора (ПИ-регулятор) обеспечивает заданные полюса замкнутой системы, а также удовлетворительную статику $W_{cl}(0) = \text{diag}(1, 1)$. Передаточная матрица замкнутой системы правильная, но не строго правильная. Для ее строгой правильности необходимо рассчитать строго правильный регулятор, который получится при увеличении порядка.

Синтез для правого полиномиального матричного разложения объекта. Используем характеристическую матрицу (11). По аналогии с (20) для правого ПМР объекта решение диофантова уравнения $\bar{R} = \bar{S}^{-1} \bar{K}_d$. После вычислений получаем следующее левое разложение и передаточную матрицу регулятора:

$$\tilde{Y} = \begin{pmatrix} \frac{7}{36} & \frac{7}{9} & 0 \\ 1 & -\frac{(s+5)}{16} & 1 \\ \frac{(s+7)}{7} & \frac{(4s-8)}{7} & \frac{4}{7} \end{pmatrix}, \quad \tilde{X} = \begin{pmatrix} -\frac{7}{9} & 0 \\ 0 & -1 \\ \frac{(8-4s)}{7} & 0 \end{pmatrix}, \quad W_r = \begin{pmatrix} -\frac{4s+20}{s-75} & \frac{-64}{s-75} \\ \frac{80}{s-75} & \frac{16}{s-75} \\ \frac{9s+45}{s-75} & \frac{144}{s-75} \end{pmatrix}.$$

Замкнутые передаточная и характеристическая матрицы следующие:

$$W_{cl}(s) = \begin{pmatrix} \frac{5s-1}{(s+1)^2} & \frac{16s-48}{(s+1)^2} \\ \frac{5s^2-15s+10}{(s+1)^2} & \frac{16}{(s+1)^2} \end{pmatrix}, \quad C(s) = \begin{pmatrix} -\frac{7}{9} & 0 & \frac{7}{36}(s-5) \\ 0 & -\frac{1}{16}(s+1)^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{7}(s+1)^2 \end{pmatrix}.$$

Перейдем от левого к правому ПМР регулятора и, подставив его в (13), получим

$$Y(s) = \begin{pmatrix} -1 & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{16}(s+5) & -\frac{5}{9} \end{pmatrix}, \quad X(s) = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{4}{9} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{C}(s) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{(s+1)^2}{9} \\ \frac{(s+1)^2}{16} & 0 \end{pmatrix},$$

или эквивалентно $\bar{Y}(s) = Y(s)G$, $\bar{X}(s) = X(s)G$, где $G = \begin{pmatrix} 0 & 16 \\ 9 & 0 \end{pmatrix}$,

$$\bar{Y}(s) = \begin{pmatrix} 1 & -16 \\ -5 & s+5 \end{pmatrix}, \quad \bar{X}(s) = \begin{pmatrix} -4 & 0 \\ 0 & 16 \\ 9 & 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{C}(s) = \begin{pmatrix} (s+1)^2 & 0 \\ 0 & (s+1)^2 \end{pmatrix}.$$

Как видим, $\det \tilde{C} = \alpha \det C = \beta \det \bar{C}$, где β константа.

Для левого разложения объекта рассчитан регулятор первого порядка с астатизмом по заданию. Для правого разложения объекта так же был рассчитан регулятор первого порядка, но без астатизма. Так как число входов не равно числу выходов, то характеристическая матрица может быть разного размера, и для синтеза следует выбирать такое разложение, в котором она меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены четыре эквивалентных описания замкнутой системы (14), (15), (16), (17), представленной на рис. 1, каждое из них по-своему раскрывает свойства системы. В настоящей работе делается упор на два описания – левое ПМР объекта и правое – регулятора, а также правое ПМР объекта и левое – регулятора. Они в первую очередь необходимы для синтеза системы управления, так как позволяют выделить характеристическую матрицу замкнутой системы: в уравнении (11) – правую и в уравнении (13) – левую. В рассматриваемом примере неквадратного объекта они различного размера: левая 2×2 и правая 3×3 . Характеристическая матрица меньшего размера более приспособлена для расчета регулятора. Так, для регулятора нулевого порядка, рассчитанного для левого объекта по формуле (13), левая ХМЗС имеет диагональный вид, а после перехода к правой по формуле (11) – недиагональный и содержит в себе элементы с правыми корнями. Тем не менее характеристический полином левой и правой ХМЗС одинаков. То есть при интуитивно удобной записи левой желаемой ХМЗС в диагональном виде ее правое представление не диагонально и имеет в своем составе полиномы с отличными от желаемых корнями. Проверив обратное, получим, что расчет регулятора для правого ПМР объекта по формуле (11) так же не диагонально и имеет полиномы с положительными корнями, тем не менее синтезирован-

ная система устойчива и имеет заданные полюса. Левая ХМЗС рассчитанной системы имеет диагональный вид с заданными полюсами. Из этого можно сделать вывод, что рассчитывать систему управления для ПМР объекта и регулятора возможно по формулам (11) и (13), но для случая объекта с количеством входов большим, чем выходов ($m > p$), предпочтительно использовать формулу (13) для левой ХМЗС. В дальнейших работах будет показано, что для случая $m < p$ предпочтительно использовать формулу (11) для правой ХМЗС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 2nd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.
2. *Vidyasagar M.* Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 1. – San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2011. – 184 p.
3. *Vidyasagar M.* Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 2. – San Rafael, CA: Morgan and Claypool, 2011. – 227 p.
4. *Antsaklis P.J., Michel A.N.* Linear systems. – New York: McGraw-Hill, 1997. – 670 p.
5. *Воевода А.А., Чехонадских А.В., Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения: разделение движений при стабилизации трехмассовой системы // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 2 (43). – С. 39–46.
6. *Воевода А.А.* Стабилизация двухмассовой системы: полиномиальный метод синтеза двухканальной системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 4 (58). – С. 121–124.
7. *Бобобеков К.М.* Полиномиальный метод синтеза многоканальных систем посредством перехода к матричному полиномиальному представлению // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 1. – С. 7–25.
8. *Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза многоканальных динамических систем с использованием полиномиального разложения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 192 с.
9. *Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов пониженного порядка: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 173 с.
10. *Бобобеков К.М.* Полиномиальный метод синтеза многоканальных регуляторов с использованием матрицы Сильвестра: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – СПб., 2019. – 168 с.
11. *Матухина О.В.* О задаче управления движением колесной системы с перевернутым маятником // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 24. – С. 235–237.
12. Стабилизация обратного маятника на двухколесном транспортном средстве / *А.В. Рязских, М.Е. Семенов, А.Г. Рукавицын, О.И. Конищева, А.А. Демчук, П.А. Мелешенко* // Вестник Южно-Уральского университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 41–50.
13. *Воевода А.А., Филушов В.Ю.* Линеаризация обратной связью // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 68–76.
14. *Воевода А.А., Филушов В.Ю.* Линеаризация обратной связью: перевернутый маятник // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 3 (85). – С. 49–60.
15. *Филушов В.Ю.* Примеры использования нелинейных обратных связей для нелинейных объектов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 3 (85). – С. 61–70.
16. *Воевода А.А., Шипагин В.И.* Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 25–36.
17. *Воевода А.А., Корюкин А.Н., Чехонадских А.В.* О понижении порядка стабилизирующего управления на примере двойного перевернутого маятника // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 6. – С. 69–83.

18. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
19. Slotine J.J.E., Li W. Applied nonlinear control. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991. – 459 p.
20. Marino R., Yomei P. Nonlinear control design: geometric, adaptive, and robust. – London, New York: Prentice Hall, 1995. – 396 p.
21. Филюшов В.Ю. Линеаризация обратной связью: эвристический подход // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 1 (83). – С. 37–46.
22. Воевода А.А., Вороной В.В. Синтез нелинейного регулятора для динамического нелинейного объекта // Сборник научных трудов НГТУ. – 2013. – № 1 (71). – С. 3–12.
23. Филюшов В.Ю. Линеаризация нелинейного трехканального динамического объекта обратной связью // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 1 (66). – С. 74–85.
24. Воевода А.А., Филюшов В.Ю. Линеаризация двухканальной системы с нелинейным выходом при помощи обратной связи // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 4 (86). – С. 49–61.
25. Буков В.Н., Рябченко В. Вложение систем. Синтез регуляторов // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 7. – С. 3–14.
26. Вложение систем / В.Н. Буков, В.С. Калабухов, И.М. Максименко, В.Н. Рябченко // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 8. – С. 61–73.
27. Буков В.Н. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – № 3. – С. 41–48.
28. Буков В.Н., Косьянчук В.В., Рябченко В.Н. Вложение систем. Полиномиальные уравнения // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 7. – С. 12–23.
29. Воевода А.А., Бобобеков К.М., Филюшов В.Ю. Полиномиальный метод синтеза для объекта с двумя входами и одним выходом // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 17–32.
30. Шипагин В.И., Воевода А.А. Пример полиномиального синтеза регулятора для объекта с одним входом и двумя выходами // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов. – Новосибирск, 2020. – Ч. 1. – С. 84–88.
31. Филюшов В.Ю. Управление неквадратным объектом полиномиальным методом // Наука. Промышленность. Оборона: труды XXI Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 2020. – Т. 3. – С. 36–40.
32. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Физматлит, 2010. – 560 с.
33. Воевода А.А. Матричные передаточные функции. (Основные понятия): конспект лекций по курсу «Проектирование систем управления» для 4–5 курсов АВТФ (специальность 2101). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1994. – 94 с.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез многоканальных систем, нейронные регуляторы. Имеет более 300 печатных работ и учебных пособий. E-mail: ucit@ucit.ru

Филюшов Владислав Юрьевич, аспирант кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез многоканальных систем, нелинейные системы. Имеет более 20 печатных работ и учебных пособий. E-mail: filiushov.vladislav@gmail.com

Voevoda Alexander A., PhD (Eng), professor at the Automation Department of Novosibirsk State Technical University. His research interests include multichannel systems synthesis and neural network regulators. He has more than 300 publications and teaching manuals. E-mail: ucit@ucit.ru

Filiushov Vladislav Yu., postgraduate student at the Automation Department of Novosibirsk State Technical University. His research interests include multichannel systems synthesis. He has more than 20 publications and teaching manuals. E-mail: filiushov.vladislav@gmail.com

Polynomial matrix decomposition for the synthesis of non-square control systems*A.A. VOEVODA^a, V.Yu. FILIUSHOV^b

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

^a ucit@ucit.ru ^b filiushov.vladislav@gmail.com**Abstract**

The application of advanced synthesis methods is due to the increasing complexity of control objects. Relatively simple objects are represented as a single-channel system or as a combination of such systems and are calculated separately. More complex systems must be viewed as multi-input and multi-output systems. There are several approaches to this. Within the framework of this paper we will consider the synthesis of a system presented in the form of a polynomial matrix decomposition. It allows us to write a closed loop system in such a way that, by analogy with single-channel systems, it is possible to single out the "numerator" and "denominator" not only of the object and the controller, but of the entire system. For multi-channel objects, they will be written in a matrix form allowing you to select the characteristic matrix whose determinant is the characteristic polynomial.

In this paper, an emphasis is placed on the derivation of four variants of the polynomial matrix description (PMD) of a closed system. Such a variety of representation of a closed-loop system follows from the equivalent writing of the transfer matrix in the form of left and right PMD of an object or controller. Of the four options for recording the system, two options – left and right – for the characteristic matrix are distinguished. When they are reduced to a diagonal form, the elements on the main diagonal contain the poles of a closed system along the corresponding channel. From the example given at the end of the paper, it can be seen that it is more convenient to use the left characteristic matrix because it has a lower dimension for a non-square object (the number of input and output quantities is not equal), with the number of input actions exceeding the number of output quantities. The right characteristic matrix can also be used to synthesize such a control object, but the resulting solution is more complicated and not obvious. The situation is reversed if we consider an object with fewer inputs than outputs. In this case, the right characteristic matrix will be smaller and more suitable for synthesis. It follows from this that the procedure for synthesizing a control system for non-square objects differs depending on the number of inputs and outputs.

Keywords: multichannel, interconnection, non-square, polynomial matrix description, characteristic matrix, synthesis, Sylvester matrix, Diophantine equation

REFERENCES

1. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 2nd ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.
2. Vidyasagar M. *Control system synthesis: a factorization approach*. Pt. 1. San Rafael, CA, Morgan and Claypool, 2011. 184 p.
3. Vidyasagar M. *Control system synthesis: a factorization approach*. Pt. 2. San Rafael, CA, Morgan and Claypool 2011. 227 p.
4. Antsaklis P.J., Michel A.N. *Linear systems*. New York, McGraw-Hill, 1997. 670 p.

* Received 23 October 2020.

5. Voevoda A.A., Chekhonadskih A.V., Shoba E.V. Modal'nyi metod sinteza s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya: razdelenie dvizhenii pri stabilizatsii trekhmassovoi sistemy [Modal synthesis method using a polynomial decomposition: the separation of motions in the stabilization of the three-mass plant]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 2 (43), pp. 39–46.

6. Voevoda A.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: polinomial'nyi metod sinteza dvukhkanal'noi sistemy [Stabilization of two-mass system: polynomial method of synthesis of two-channel system]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 4 (58), pp. 121–124.

7. Bobobekov K.M. Polinomial'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh sistem posredstvom perekhoda k matrichnomu polinomial'nomu predstavleniyu [Polynomial method for the synthesis of multichannel systems by transition to matrix polynomial representation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2019, no. 1, pp. 7–25.

8. Shoba E.V. *Modal'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [The modal method for the synthesis of multi-channel dynamic systems using a polynomial expansion. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 192 p.

9. Voronoi V.V. *Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov ponizhennogo poryadka*. Diss. kand. tekhn. nauk [A polynomial method for calculating the multi-channel controllers low order. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 173 p.

10. Bobobekov K.M. *Polinomial'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh regulyatorov s ispol'zovaniem matritsy Sil'vestra*. Diss. kand. tekhn. nauk [Polynomial control method for multi-channel dynamic system by Sylvester matrix. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2019. 168 p.

11. Matukhina O.V. O zadache upravleniya dvizheniem kolesnoi sistemy s perevernutym mayatnikom [About moving control of wheels system with inverted pendulum]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, 2014, no. 24, pp. 235–237.

12. Ryaghsikh V.I., Semenov M.E., Rukavicin A.G., Kanishcheva O.I., Demchuk A.A., Meleshko P.A. Stabilizatsiya obratnogo mayatnika na dvukhkolesnom transportnom sredstve [Stabilization of inverted pendulum on a two-wheeled vehicle]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika = Bulletin of the South Ural State University Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 41–50.

13. Voevoda A.A., Filyushov V.Yu. Linearizatsiya obratnoi svyaz'yu [Feedback linearization]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (84), pp. 68–76.

14. Voevoda A.A., Filyushov V.Yu. Linearizatsiya obratnoi svyaz'yu: perevernutyi mayatnik [Feedback linearization: inverted pendulum]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (85), pp. 49–60.

15. Filyushov V.Yu. Primery ispol'zovaniya nelineinykh obratnykh svyazei dlya nelineinykh ob"ektov [Examples of applying of nonlinear output injection for nonlinear objects]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3 (85), pp. 61–70.

16. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Sintez neirosetevogo regulyatora upravleniya nelineinnoi model'yu perevernutogo mayatnika na telezhke [Synthesis of a neural network control regulator of a nonlinear model of an inverted pendulum on a cart]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 25–36.

17. Voevoda A.A., Koryukin A.N., Chekhonadskikh A.V. O ponizhenii poryadka stabiliziruyushchego upravleniya na primere dvoynogo perevernutogo mayatnika [Reducing the stabilizing control order for a double inverted pendulum]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, vol. 48, no. 6, pp. 69–83. (In Russian).
18. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. T. 2. *Mnogomernye, nelineinye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* [The theory of automatic control. Vol. 2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 464 p.
19. Slotine J.J.E., Li W. *Applied nonlinear control*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1991. 459 p.
20. Marino R., Yomei P. *Nonlinear control design: geometric, adaptive, and robust*. London, New York, Prentice Hall, 1995. 396 p.
21. Filiushov V.Yu. Linearizatsiya obratnoi svyaz'yu: evristicheskii podkhod [Feedback linearization: heuristic approach]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 1 (83), pp. 37–46.
22. Voevoda A.A., Voronoi V.V. Sintez nelineinogo regulyatora dlya dinamicheskogo nelineinogo ob"ekta [The nonlinear controller synthesis for a dynamic nonlinear object]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 1 (71), pp. 3–12.
23. Filiushov V.Yu. Linearizatsiya nelineinogo trekhkanal'nogo dinamicheskogo ob"ekta obratnoi svyaz'yu [Linearization of multichannel object by output injectio]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (66), pp. 74–85.
24. Voevoda A.A., Filiushov V.Yu. Linearizatsiya dvukhkanal'noi sistemy s nelineinym vykhodom pri pomoshchi obratnoi svyazi [Linearization by feedback of two channel object]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (86), pp. 49–61.
25. Bukov V.N., Ryabchenko V. Vlozhenie sistem. Sintez regulyatorov [System embedding. Controller design]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2000, no 7, pp. 3–14. (In Russian).
26. Bukov V.N., Kalabukhov V.S., Maksimenko I.M., Ryabchenko V.N. Vlozhenie system [System embedding]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 1999, no. 8, pp. 61–73. (In Russian).
27. Bukov V.N. Analiticheskii podkhod k analizu i sintezu matrichnykh sistem [Analytical approach for analysis and synthesis of matrix systems]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskije nauki = Izvestiya Southem Federal University. Engineering sciences*, 2006, no 3, pp. 41–48.
28. Bukov V.N., Kosyanchuk V.V., Ryabchenko V.N. Vlozhenie sistem. Polinomial'nye uravneniya [Systems embedded. Polynomial equations]. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*, 2002, no. 7, pp. 12–23. (In Russian).
29. Voevoda A.A., Bobobekov K.M., Filiushov V.Yu. Polinomial'nyi metod sinteza dlya ob"ekta s dvumya vkhodami i odnim vykhodom [Polynomial synthesis method for objects with two inputs and one output]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 17–32.
30. Shipagin V.I., Voevoda A.A. [Polynomial regulator synthesis example for object with one input and two ouputs]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovations], Novosibirsk, 2020, pt. 1, pp. 84–88. (In Russian).
31. Filiushov V.Yu. [Non square object control by polynomial method]. *Nauka. Promyshlennost'. Oborona: trudy XXI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Science. Industry. Defense: Proceedings of 21st Russian scientific and technical conference], Novosibirsk, 2020, vol. 3, pp. 36–40. (In Russian).

32. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 560 p.
33. Voevoda A.A. *Matrichnye peredatochnye funktsii (Osnovnye ponyatiya): konspekt lektsii po kursu "Proektirovanie sistem upravleniya"* [Matrix transfer functions (Basic concepts): a summary of lectures on the course "Designing of control systems"]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1994. 94 p.

Для цитирования:

Воевода А.А., Филушов В.Ю. Полиномиальное матричное разложение при синтезе не-квадратных САУ // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 21–38. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-21-38.

For citation:

Voevoda A.A., Filiushov V.Yu. Polinomial'noe matrichnoe razlozhenie pri sinteze nekvadratnykh SAU [Polynomial matrix decomposition for the synthesis of non-square control systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 21–38. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-21-38.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 51-7: 62-52

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60

Синтез регулятора для нелинейных объектов с запаздыванием методом разделения движений с применением критериев устойчивости*

В.А. ГРИНКЕВИЧ

*630501, РФ, Новосибирская область, Новосибирский район, Краснообск, а/я 463,
Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН*

grinkevich-vova@mail.ru

Регуляторы и обратная связь применяются во многих технических задачах (например, поддержание заданной температуры внутри термостата, стабилизация скорости вращения электродвигателя). Для синтеза регуляторов широко применяются различные методы (например, метод разделения движений, частотный метод, процедура Циглера–Никольса). Однако частотный метод применяется для линейных объектов с пренебрежимо малым запаздыванием. При применении процедуры Циглера–Никольса не задается требуемое качество переходного процесса. При управлении объектов с запаздыванием иногда применяют упредитель Смита. Однако при не полностью известной математической модели применение упредителя Смита может быть затруднено. Существует работа, где рассматривается применение метода разделения движений с запаздыванием. Однако предложенный в той работе метод расчета требует решения системы из четырех нелинейных уравнений для объекта второго порядка. Поэтому в настоящей работе исследуется возможность более простого способа расчета регулятора, а именно возможность применения критерия Михайлова при синтезе регулятора по методу разделения движений для нелинейных объектов с запаздыванием. Также в статье рассмотрено применение критерия Найквиста с более простой процедурой расчета, чем предложенная ранее. В статье сравниваются значения коэффициентов регулятора, полученных с применением критерия Найквиста и критерия Михайлова. Критерий Михайлова и критерий Найквиста применяются для оценки устойчивости подсистемы быстрых движений. В статье рассматривается вывод формул расчета параметров регулятора, синтезируемого с помощью метода разделения движений, для нелинейных объектов с запаздыванием первого и второго порядка с применением критерия Михайлова. Исследуются переходные процессы с помощью численного моделирования. Приведены графики процессов. Выяснено, какими параметрами регулятора нужно улучшать качество переходных процессов при наличии запаздывания. Результаты этой работы могут быть применены при проектировании самонастраивающихся регуляторов для объектов с запаздыванием. Нелинейными объектами с запаздыванием являются элемент Пельтье, стенд прочностных испытаний летательных аппаратов, термостат, оборудование для проката металла. Приводятся годографы Михайлова для объектов с запаздыванием.

* *Статья получена 23 сентября 2020 г.*

Ключевые слова: объект с запаздыванием, нелинейный объект, метод разделения движений, критерий Михайлова, годограф Михайлова, критерий Найквиста, регулятор, элемент Пельтье

ВВЕДЕНИЕ

Существуют задачи, где требуется управление процессами. Например, в термостатах [1] требуется поддержание заданной температуры. В автономных источниках электропитания [2–4] требуется стабилизация выходного напряжения. Для исследования реакции растения на тепловое воздействие применяется термостоллик [5], который может генерировать температурный профиль [6]. Для таких задач требуется применение обратной связи и расчет регулятора [7–9]. Также применение обратной связи и регулятора применяется для автоматизации технологических процессов и производств [10].

Метод разделения движений [5, 7, 11–14] широко применяется при синтезе регуляторов для линейных и нелинейных объектов управления. В учебном пособии [7] расписывается расчет регулятора для линейных объектов без запаздывания. Для линейных объектов с запаздыванием в учебном пособии рекомендуется применять предиктор Смита [15]. Однако для нелинейных объектов с нестационарными параметрами и отсутствием полной информации о математической модели применение предиктора Смита может не гарантировать заданное качество переходного процесса. Применение метода разделения движений для нелинейных объектов рассматривается в работах [5–14]. В статье [5] рассматривается расчет регулятора температуры для генератора температурного профиля на основе элемента Пельтье с применением метода разделения движения и эмпирической подстройкой общего коэффициента для снижения колебательности, возникаемой из-за наличия запаздывания в объекте управления. Однако эмпирические методы [16] не всегда являются эффективными. В статье [12] рассматривается применение метода разделения движений для объекта с запаздыванием с применением критерия Найквиста. Однако для объекта второго порядка способ, предложенный в статье [12], требует решения систем четырех нелинейных уравнений, что является затрудненным.

Поэтому в настоящей работе рассматривается расчет регулятора для нелинейных объектов с запаздыванием с помощью метода разделения движений и критерия Михайлова [8], а также расчет регулятора с применением критерия Найквиста [8], но с более простой процедурой, чем в [12]. Однако для объекта второго порядка рассмотрен способ с применением системы из двух нелинейных уравнений, в отличие от изложенного в [12]. Проведено численное моделирование. Приведены графики переходных процессов. Предложенные методы могут быть использованы для расчета регулятора для термостоллика на основе элемента Пельтье и других устройств с запаздыванием.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является исследование возможности применения критерия Михайлова для оценки устойчивости подсистемы быстрых движений, вывод формул для расчета параметров регулятора для нелинейных объектов

первого и второго порядка с запаздыванием с помощью метода разделения движений с применением критерия Михайлова и сравнение параметров регулятора, полученных по критерию Найквиста, с параметрами, полученными по критерию Михайлова.

В работе [5] предложена задача «Проектирование самонастраивающегося регулятора» для элемента Пельтье. Результаты указанной работы могут быть использованы при проектировании самонастраивающихся регуляторов, автоматизации расчета регуляторов и иметь эффективность выше, чем эмпирические методы [16].

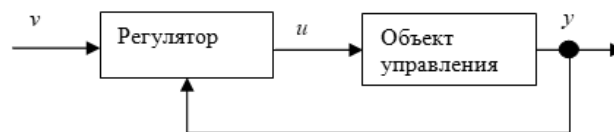


Рис. 1. Структурная схема системы управления с обратной связью

Fig. 1. Block diagram of the feedback control system

Схема систем управления с обратной связью показана на рис 1.

2. РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО КРИТЕРИЮ МИХАЙЛОВА

В учебном пособии [7] рассматривается вывод математической модели регулятора, рассчитываемого по методу разделения движений, для объекта первого порядка.

Уравнение объекта первого порядка имеет вид

$$\frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t) + M(t),$$

где y – выходная величина объекта управления; t – время; a_0 – параметр, учитывающий постоянную времени переходного процесса; b_0 – коэффициент передачи; u – управляющее воздействие; M – возмущение. Для нелинейного объекта b_0 не является постоянным коэффициентом и может зависеть от y , u , t . Однако b_0 и его производная по времени должны меняться в ограниченном диапазоне значений.

Уравнение регулятора для следящей системы первого порядка имеет вид

$$\mu \frac{du(t)}{dt} = k_0 \left(\frac{y_d(t) - y(t)}{T_d} + \frac{d}{dt} (y_d(t) - y(t)) \right), \quad (1)$$

где μ – малый параметр; k_0 – общий коэффициент регулятора; y_d – желаемая (заданная) выходная величина; T_d – желаемая постоянная времени.

Уменьшение параметра μ приводит к формированию быстрых процессов по управляющему воздействию u и медленных процессов по выходной величине y . При этом $\mu > 0$.

В учебном пособии [7] рекомендуется выбирать $b_0k_0 = 1$ для систем без запаздывания. При таком выборе постоянная времени контура быстрых движений T_f равна малому параметру μ . Для обеспечения требуемого качества переходного процесса по выходной величине y необходимо выполнение следующего условия:

$$T_d / T_f = \eta, \quad \eta \geq 10,$$

где η – степень разделения движений.

Однако при наличии запаздывания может отсутствовать возможность обеспечения $\eta \geq 10$. Также при наличии запаздывания выбор $b_0k_0 = 1$ при $\mu = T_d / \eta$ и $\eta \geq 10$ может быть невозможным. Однако при η в диапазоне от 2,5 до 10 переходные процессы по выходной величине могут с небольшим отклонением соответствовать заданным требованиям, и в таком случае может повыситься реакция системы на возмущение.

Уравнение объекта первого порядка с запаздыванием имеет вид

$$\frac{dy(t)}{dt} + a_0y(t) = b_0u(t - t_{\text{зап}}) + M(t), \quad (2)$$

где $t_{\text{зап}}$ – время запаздывания. Подставляя (2) в (1), получим

$$\mu \frac{du(t)}{dt} = k_0 \left(\frac{y_d(t) - y(t)}{T_d} + \frac{dy_d(t)}{dt} - (-a_0y(t) + b_0u(t - t_{\text{зап}}) + M(t)) \right).$$

Запишем последнее уравнение в виде

$$\mu \frac{du(t)}{dt} = -k_0b_0u(t - t_{\text{зап}}) + \psi, \quad (3)$$

где

$$\psi = k_0 \left(\frac{y_d(t) - y(t)}{T_d} + \frac{dy_d(t)}{dt} - (-a_0y(t) + M(t)) \right).$$

В статье [12] рассматривался расчет регулятора по методу разделения движений для систем с запаздыванием с применением критерия Найквиста. Однако способ, предложенный в статье [12], для систем второго порядка сводится к решению системы из четырех нелинейных уравнений, что является затруднительным. В связи с этим в настоящей статье рассматривается применение критерия Михайлова для расчета регулятора по методу разделения движений для систем с запаздыванием.

Структура регулятора, описываемого уравнением (1), показана на рис 2, для которого $k_p = 1/\mu$, $k_i = 1/(\mu T_d)$, $\mu = T_d / \eta$, $\eta = 10$. Коэффициент k_0 необходимо выбрать таким, чтобы контур быстрых движений был устойчивым, имел низкую колебательность и переходные процессы в контуре медленных движений соответствовали заданным требованиям.

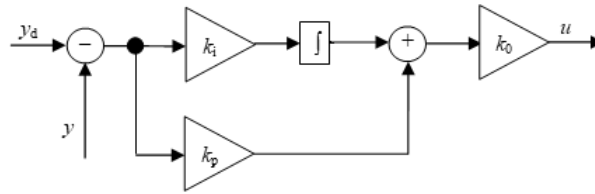


Рис. 2. Структурная схема следящего ПИ-регулятора

Fig. 2. Block diagram of the tracking PI-controller

Необходимым условием для обеспечения требуемого качества переходного процесса в подсистеме медленных движений является устойчивость и низкая колебательность подсистемы быстрых движений.

Обозначим $k_1 = k_0 b_0$ и введем быстрое время $t_f = t / \mu$. В таком случае уравнение (3) можно записать для быстрого времени в виде

$$\frac{du(t_f)}{dt_f} = -k_1 u \left(t_f - \frac{t_{\text{зап}}}{\mu} \right) + \psi. \quad (4)$$

На интервале быстрого времени переменные y_d , y , M , входящие в ψ , рассматриваются как постоянные величины. Выполним преобразование Лапласа для уравнения (4):

$$su = -k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s} u + \psi.$$

Далее получим передаточную функцию контура быстрых движений

$$W(s) = \frac{u(s)}{\psi(s)} = \frac{1}{s + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}}. \quad (5)$$

Знаменатель передаточной функции (5) имеет вид

$$F(s) = s + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}.$$

После замены s на ωi , где i – мнимая единица, получим

$$F(\omega i) = \omega i + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)\omega i}. \quad (6)$$

Запишем (6) в виде

$$F(\omega i) = \omega i + k_1 (\cos(-t_{\text{зап}}\omega / \mu) + \sin(-t_{\text{зап}}\omega / \mu)i).$$

Для устойчивости системы первого порядка без запаздывания необходимо, чтобы годограф Михайлова [8] начинался на вещественной оси в точке $a_1 > 0$ и стремился к бесконечности в первом квадранте (рис 3). Для систем с запаздыванием, описываемых передаточной функцией (5), при $k_1 > 0$ годограф Михайлова имеет вид, показанный на рис. 4 и 5. Для устойчивости таких систем необходимо, чтобы годограф Михайлова начинался на вещественной оси в точке $k_1 > 0$ и не проходил через четвертый квадрант (рис. 4, а) или проходил через четвертый квадрант и через точку на интервале от 0 до k_1 ,

переходя в первый квадрант (рис. 4, б). Если годограф Михайлова для системы с запаздыванием, описываемой передаточной функцией (5), начинается на вещественной оси в точке $k_1 > 0$, затем проходит в четвертый квадрант и через точку $(0, 0)$ переходит во второй квадрант (рис. 5, а), то система находится на границе устойчивости. Если годограф Михайлова для системы с запаздыванием, описываемой передаточной функцией (5), начинается на вещественной оси в точке $k_1 > 0$, затем проходит в четвертый квадрант, потом через мнимую ось проходит в третий квадрант (рис. 5, б), то система неустойчива. Если годограф Михайлова не обращается в отрицательную мнимую полуплоскость (рис. 4, а), то система обладает большим запасом устойчивости, чем в случае, показанном на рис. 4, б, поэтому при выборе k_1 воспользуемся случаем на рис. 4, а:

$$\omega i + \sin(-t_{\text{зап}} \omega / \mu) i > 0, \quad (7)$$

$$\omega > k_1 \sin(t_{\text{зап}} \omega / \mu).$$

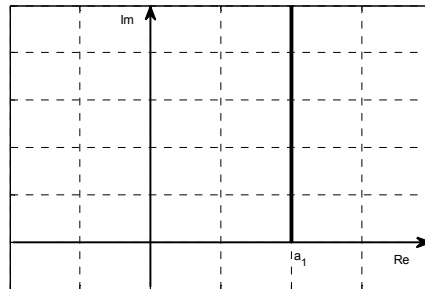


Рис. 3. Годограф Михайлова для устойчивой системы первого порядка без запаздывания

Fig. 3. The Mikhailov hodograph of the steady state first-order system without a transport delay

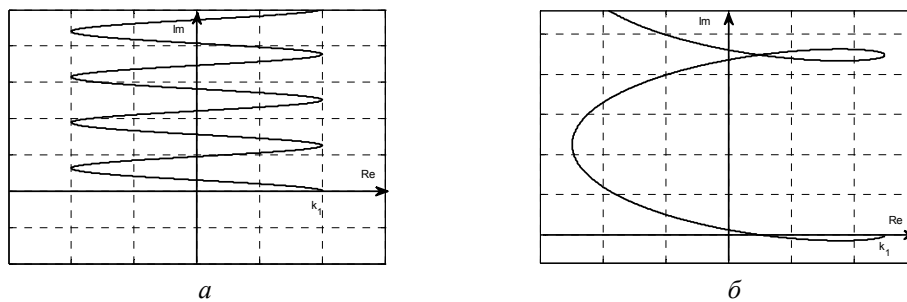


Рис. 4. Годограф Михайлова для устойчивой системы, описываемой передаточной функцией (5):

а – с большим запасом устойчивости; б – с меньшим запасом устойчивости

Fig. 4. The Mikhailov hodograph of the steady state system described by the transfer function (5):

a is further from the edge of a steady state; б is nearer to the edge of a steady state

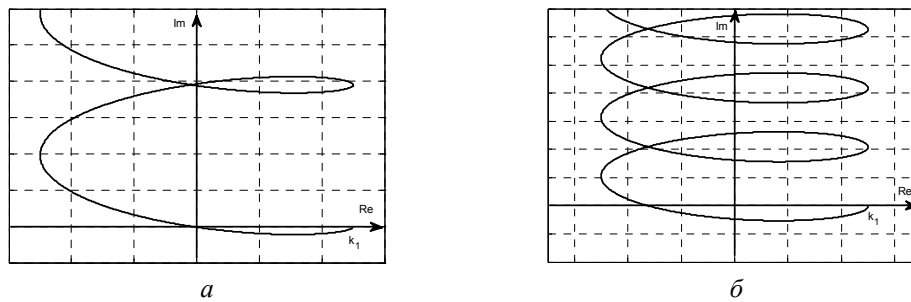


Рис. 5. Годограф Михайлова для системы первого порядка, описываемой передаточной функцией (5):

a – система на границе устойчивости; *б* – неустойчивая система

Fig. 5. The Mikhailov hodograph of the first-order system described by the transfer function (5):

a is system on the edge of a steady state; *b* is system a non steady state

Из математики известно, что если при каких-либо значениях ω значение синуса больше значения линейной функции, то значение синуса будет больше при значениях $\omega \approx 0$. Также известно, что при $t_{\text{зап}}\omega / \mu \approx 0$ имеет место $\sin(t_{\text{зап}}\omega / \mu) \approx t_{\text{зап}}\omega / \mu$. В результате получим

$$\omega > k_1 t_{\text{зап}} \omega / \mu. \quad (8)$$

Таким образом, $k_1 < \mu / t_{\text{зап}}$.

Далее проведем численное моделирование для объекта управления, описываемого уравнением (2), для которого $a_0 = 0,25$, $b_0 = 0,6 + 0,05u(t - t_{\text{зап}}) + 0,1y(t)$, $t_{\text{зап}} = 1,5$ с. В таком случае $k_0 = k_1 / (0,6 + 0,05u(t - t_{\text{зап}}) + 0,1y(t))$. Зададим желаемую постоянную времени переходного процесса $T_d = 4$ с. В таком случае $\mu = 0,4$ с, $k_p = 2,5$, $k_i = 0,625$.

По результатам численного моделирования (рис. 12–14) рекомендуется выбирать $k_1 = 0,5\mu / t_{\text{зап}}$, однако этот выбор не является четко обязательным, и при расчете регулятора для конкретного объекта может потребоваться дополнительная подстройка k_1 .

3. РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА ВТОРОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО КРИТЕРИЮ МИХАЙЛОВА

В учебном пособии [7] рассматривается вывод математической модели регулятора, рассчитываемого по методу разделения движений, для объекта второго порядка.

Уравнение объекта второго порядка имеет вид

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t) + M(t),$$

где y – выходная величина объекта управления; t – время; a_1, a_0 – параметры, характеризующие переходный процесс; b_0 – коэффициент передачи; u – управляющее воздействие; M – возмущение. Для нелинейного объекта b_0 не является постоянным коэффициентом и может зависеть от y, u, t . Однако b_0 и его производная по времени должны меняться в ограниченном диапазоне значений.

Обозначим $\theta(t) = y_d(t) - y(t)$. Уравнение регулятора для следящей системы второго порядка имеет вид

$$\mu^2 \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + d_1 \mu \frac{du(t)}{dt} = k_0 \left(\frac{\theta(t)}{T_d^2} + \frac{a_d}{T_d} \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} \right), \quad (9)$$

где μ – малый параметр; $d_1 = 2$; k_0 – общий коэффициент регулятора; y_d – желаемая (заданная) выходная величина; T_d – желаемая постоянная времени; $a_d = 2$.

Уравнение объекта второго порядка с запаздыванием имеет вид

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t - t_{\text{зап}}) + M(t). \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), получим

$$\mu^2 \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + d_1 \mu \frac{du}{dt} = -k_0 b_0 u(t - t_{\text{зап}}) + \psi(t), \quad (11)$$

$$\psi = k_0 \left(\frac{\theta(t)}{T_d^2} + \frac{a_d}{T_d} \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{d^2 y_d(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy_d(t)}{dt} + a_0 y_d(t) - M(t) \right).$$

Введем $k_1 = k_0 b_0$ и запишем уравнение (11) для быстрого времени в виде

$$\frac{d^2 u(t_f)}{dt_f^2} + d_1 \frac{du(t_f)}{dt_f} = -k_1 u \left(t_f - \frac{t_{\text{зап}}}{\mu} \right) + \psi. \quad (12)$$

На интервале быстрого времени переменные y_d, y, M , входящие в ψ , рассматриваются как постоянные величины.

Структура регулятора, описываемого уравнением (9), приведена на рис. 6. В уравнении (9) k_p, k_i, k_d, τ рассчитываются по формулам:

$$k_p = \frac{a_d d_1 T_d - \mu}{\mu d_1^2 T_d^2}, \quad k_i = \frac{1}{\mu d_1 T_d^2}, \quad k_d = \frac{\mu^2 + d_1^2 T_d^2 - a_d d_1 \mu T_d}{\mu d_1^3 T_d^2}, \quad \tau = \frac{\mu}{d_1}.$$

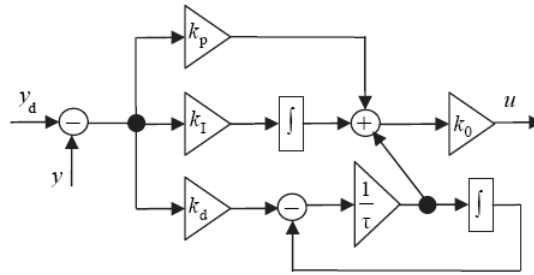


Рис. 6. Структурная схема следящего ПИД-регулятора

Fig. 6. Block diagram of the tracking PID-controller

Выполним преобразование Лапласа для уравнения (12):

$$s^2 u(s) + d_1 s u = -k_0 b_0 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s} u + \psi.$$

Далее получим передаточную функцию контура быстрых движений

$$W(s) = \frac{u(s)}{\psi(s)} = \frac{1}{s^2 + d_1 s + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}}. \quad (13)$$

Знаменатель передаточной функции (13) имеет вид

$$F(s) = s^2 + d_1 s + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}.$$

После замены s на ωi получим

$$F(\omega i) = -\omega^2 + d_1 \omega i + k_1 e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)\omega i}. \quad (14)$$

Запишем (14) в виде

$$F(\omega i) = -\omega^2 + d_1 \omega i + k_1 (\cos(-(t_{\text{зап}}/\mu)\omega) + \sin(-(t_{\text{зап}}/\mu)\omega)i).$$

Для устойчивости системы второго порядка без запаздывания необходимо, чтобы годограф Михайлова начинался на вещественной оси в точке $a_1 > 0$, затем пошел в первый квадрант, далее через мнимую ось – во второй квадрант и стремился к бесконечности во втором квадранте (рис. 7). Для систем с запаздыванием, описываемых передаточной функцией (13), при $k_1 > 0$ годограф Михайлова имеет вид, показанный на рис. 8 и 9. Для устойчивости таких систем необходимо, чтобы годограф Михайлова начинался на вещественной оси в точке $k_1 > 0$, затем пошел в первый квадрант (рис. 8, а), далее через мнимую ось – во второй квадрант и стремился к бесконечности во втором квадранте, или начинался на вещественной оси в точке $k_1 > 0$, затем пошел в четвертый квадрант, затем, пересекая вещественную ось в точке на интервале от 0 до k_1 , пошел в первый квадрант, далее

через мнимую ось – во второй квадрант и стремился к бесконечности во втором квадранте (рис. 8, б). Если годограф Михайлова для системы с запаздыванием, описываемой передаточной функцией (13), начинается на вещественной оси в точке $k_1 > 0$, затем проходит в четвертый квадрант и через точку $(0, 0)$ переходит во второй квадрант (рис. 9, а), то система находится на границе устойчивости. Если годограф Михайлова для системы с запаздыванием, описываемой передаточной функцией (13), начинается на вещественной оси в точке $k_1 > 0$, затем проходит в четвертый квадрант, потом через мнимую ось проходит в третий квадрант (рис. 9, б), то система неустойчива. Если годограф Михайлова не обращается в отрицательную мнимую полуплоскость (рис. 8, а), то система обладает большим запасом устойчивости, чем в случае на рис. 8, б, поэтому при выборе k_1 воспользуемся случаем на рис. 8, а:

$$d_1 \omega i + k_1 \sin(-(t_{\text{зап}} / \mu) \omega) i > 0, \quad (15)$$

$$d_1 \omega > k_1 \sin((t_{\text{зап}} / \mu) \omega).$$

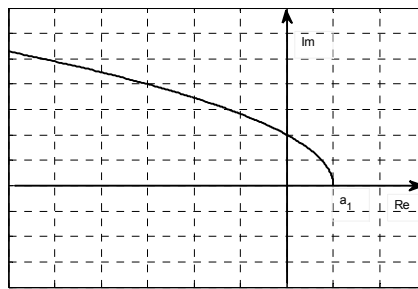


Рис. 7. Годограф Михайлова для устойчивой системы второго порядка без запаздывания

Fig. 7. The Mikhailov hodograph the steady state second-order system without a transport delay

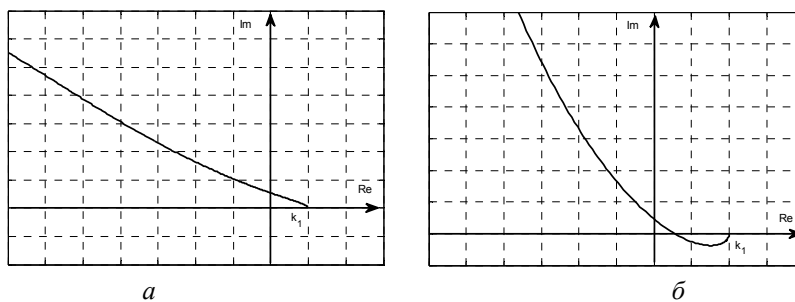


Рис. 8. Годограф Михайлова для устойчивой системы, описываемой передаточной функцией (13):

а – с большим запасом устойчивости; б – с меньшим запасом устойчивости

Fig. 8. The Mikhailov hodograph of the steady state system described by the transfer function (13):

a is further from the edge of a steady state; b is nearer to the edge of a steady state

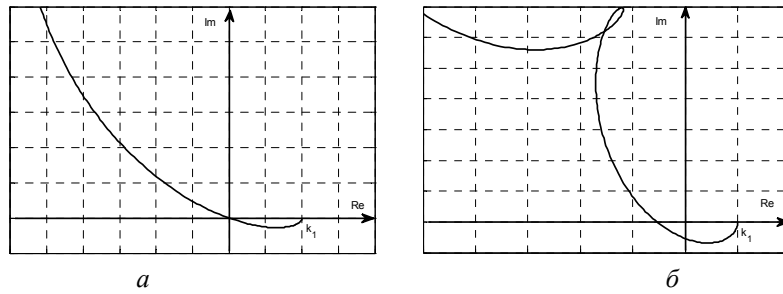


Рис. 9. Годограф Михайлова для системы второго порядка, описываемой передаточной функцией (13):

a – система на границе устойчивости; b – неустойчивая система

Fig. 9. The Mikhailov hodograph of the second-order system described by the transfer function (13):

a is system on the edge of a steady state; b is system a non steady state

Из (15) видно, что устойчивость и качество переходных процессов возможно обеспечить с помощью параметров d_1 , k_1 или μ . Однако требуется исследовать влияние параметров d_1 , k_1 и μ на процессы по управляемой величине y .

Из математики известно, что если при каких-либо значениях ω значение синуса больше значения линейной функции, то значение синуса будет больше при значениях $\omega \approx 0$. Также известно, что при $t_{\text{зап}} \omega / \mu \approx 0 \sin(t_{\text{зап}} \omega / \mu) \approx t_{\text{зап}} \omega / \mu$. В результате получим

$$d_1 \omega > k_1 (t_{\text{зап}} / \mu) \omega. \quad (16)$$

Из (16) получим, что при заданных $k_1 = 1$, $\mu = 0,1T_d$ нужно выбирать $d_1 > k_1 t_{\text{зап}} / \mu$; при заданных $d_1 = 2$, $\mu = 0,1T_d$ нужно выбирать $k_1 < d_1 \mu / t_{\text{зап}}$; при заданных $d_1 = 2$, $k_1 = 1$ нужно выбирать $\mu > k_1 t_{\text{зап}} / d_1$.

В качестве нелинейного объекта второго порядка с запаздыванием возьмем математическую модель устройства на основе элемента Пельтье, полученную в статье [17]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T}{dt^2} + \frac{1}{T_c} \frac{dT}{dt} = \frac{b_1}{T_c} T(t - t_{\text{зап}}) I(t - t_{\text{зап}}) + \frac{b_2}{T_c} \times \\ \times I^2(t - t_{\text{зап}}) + \frac{b_3}{T_c} (T_{\text{oc}}(t - t_{\text{зап}}) - T(t - t_{\text{зап}})), \end{aligned} \quad (17)$$

где T – температура рабочей поверхности лабораторного термостоллика на основе элемента Пельтье, измеряемая в кельвинах; $T_c = 2,56$ с; $b_1 = 0,00157 \text{ A}^{-1} \text{ c}^{-1}$; I – протекаемый через элемент Пельтье ток; $b_2 = 0,0261 \text{ A}^{-2} \text{ c}^{-1}$; $b_3 = 0,0615 \text{ c}^{-1}$; T_{oc} – температура окружающей среды, измеряемая в кельвинах.

Математическую модель (17) можно описать уравнением (10), для которого $a_1 = 1/T_c$, $a_0 = b_3/T_c$, $b_0 = (b_1T(t-t_{\text{зап}}) + b_2I(t-t_{\text{зап}}))/T_c$, $M(t) = b_3T_{\text{oc}}(t-t_{\text{зап}})/T_c$, $y = T$, $u = I$. В таком случае $k_0 = k_1T_c / (b_1T(t-t_{\text{зап}}) + b_2I(t-t_{\text{зап}}))$. Зададим желаемую постоянную времени переходного процесса $T_d = 4$ с.

По результатам численного моделирования (рис. 15–20) рекомендуется выбирать $k_1 = 0,5d_1\mu / t_{\text{зап}}$, $d_1 = 2$, $\mu = 0,1T_d$ или $d_1 = 2k_1t_{\text{зап}} / \mu$, $k_1 = 1$, $\mu = 0,1T_d$. Однако этот выбор не является четко обязательным, и при расчете регулятора для конкретного объекта может потребоваться дополнительная подстройка k_1 . Исходя из результатов численного моделирования не рекомендуется снижать колебательность системы путем выбора параметра μ при $k_1 = 1$ и $d_1 = 2$.

4. РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИТЕРИЯ НАЙКВИСТА

Структурная схема подсистемы быстрых движений, описываемой уравнением (4), для объекта первого порядка показана на рис. 10.

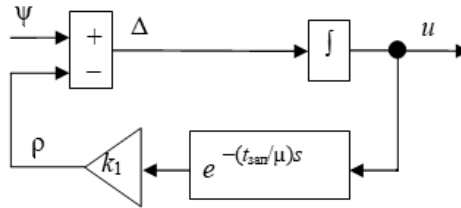


Рис. 10. Структурная схема подсистемы быстрых движений для объекта первого порядка

Fig. 10. Block diagram of the fast motions subsystem for a first-order object

Согласно логарифмическому критерию Найквиста [8] для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы ФЧХ разомкнутой системы не достигала значения $-\pi$ рад или достигала его четное количество раз на частотах, где ЛАЧХ больше нуля. При этом выходом разомкнутой системы является сигнал ρ , а входом – сигнал Δ (рис. 10).

Запишем передаточную функцию разомкнутой системы для схемы на рис. 10:

$$W_{\rho/\Delta}(s) = \frac{k_1}{s} e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}, \quad (18)$$

$$W(\omega i) = \frac{k_1}{\omega i} e^{-(t_{\text{зап}}\omega/\mu)i}.$$

Если ФЧХ разомкнутой системы, описываемой передаточной функцией (18), больше $-\pi$ на частоте, где ЛАЧХ равна нулю (АЧХ равна единице), то замкнутая система устойчивая:

$$\left| \frac{k_1}{\omega_c i} e^{-(t_{\text{зап}} \omega_c / \mu) i} \right| = 1. \quad (19)$$

Из (19) получаем $k_1 = \omega_c$. ФЧХ системы, описываемой передаточной функцией (18),

$$\varphi(\omega_c) = -0,5\pi - t_{\text{зап}} \omega_c / \mu > -\pi. \quad (20)$$

Перенесем $-\pi$ в правую часть неравенства (20) и обозначим

$$\varphi_0(\omega_c) = 0,5\pi - t_{\text{зап}} \omega_c / \mu,$$

где φ_0 – область устойчивости по фазе. Поскольку при $\varphi_0 = 0,5\pi$ частота среза будет равна нулю, то получим область устойчивости $0 < \varphi_0 < 0,5\pi$. Выберем $\varphi_0 = 0,9$. При $\varphi_0 = 0,9$, $\mu = 0,4$ с, $t_{\text{зап}} = 1,5$ с получим $k_1 = 0,18$.

При расчете k_1 с применением критерия Михайлова было проведено численное моделирование при $k_1 = 0,26$, $k_1 = 0,13$ и $k_1 = 0,013$ и выяснено, что подходящим является $k_1 = 0,13$. Следовательно, при применении критерия Найквиста требуется исследовать переходные процессы с разными значениями φ_0 и выбрать наиболее подходящий φ_0 .

Структурная схема подсистемы быстрых движений, описываемой уравнением (12), для объекта второго порядка показана на рис. 11.

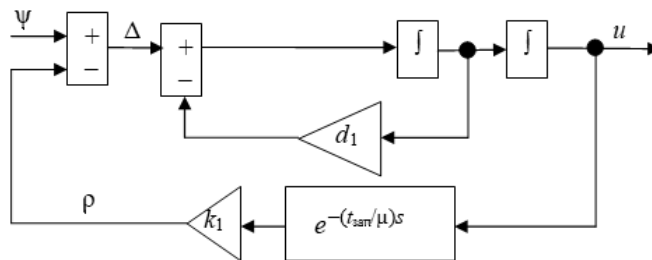


Рис. 11. Структурная схема подсистемы быстрых движений для объекта второго порядка

Fig. 11. The block diagram of the fast motions subsystem for a second-order object

Запишем передаточную функцию разомкнутой системы для схемы на рис. 11:

$$W(s) = \frac{\rho(s)}{\Delta(s)} = \frac{k_1}{(s + d_1)s} e^{-(t_{\text{зап}}/\mu)s}, \quad (21)$$

$$W(\omega i) = \frac{k_1}{(\omega i + d_1)\omega i} e^{-(t_{\text{зап}}\omega/\mu)i}.$$

Если ФЧХ разомкнутой системы, описываемой передаточной функцией (21), больше $-\pi$ на частоте, где ЛАЧХ равна нулю (АЧХ равна единице), то замкнутая система устойчивая:

$$\left| \frac{k_1}{(\omega_c i + d_1)\omega_c i} e^{-(t_{\text{зап}}\omega_c/\mu)i} \right| = 1. \quad (22)$$

Из (21) получаем

$$k_1 = \omega_c \sqrt{\omega_c^2 + d_1^2}.$$

ФЧХ системы, описываемой передаточной функцией (21),

$$\varphi(\omega_c) = -\arctg(\sqrt{1/d_1}\omega_c) - 0,5\pi - t_{\text{зап}}\omega_c/\mu > -\pi. \quad (23)$$

Перенесем $-\pi$ в правую часть неравенства (23) и обозначим

$$\varphi_0(\omega_c) = -\arctg(\sqrt{1/d_1}\omega_c) + 0,5\pi - t_{\text{зап}}\omega_c/\mu,$$

где φ_0 – область устойчивости по фазе. Поскольку при $\varphi_0 = 0,5\pi$ частота среза будет равна нулю, то получим область устойчивости $0 < \varphi_0 < 0,5\pi$. При $\varphi_0 = 0,9$, $\mu = 0,4$ с, $t_{\text{зап}} = 1,5$ с получим $k_1 = 0,27$. Рассчитанный коэффициент k_1 по критерию Найквиста для объекта второго порядка почти соответствует k_1 , рассчитанному при применении критерия Михайлова, при $\varphi_0 = 0,9$. При расчете d_1 при заданных k_1 и μ решить систему из уравнений (22) и (23) будет сложнее.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. ДЛЯ ОБЪЕКТА ПЕРВОГО ПОРЯДКА

На рис. 12–14 показаны процессы в системе управления объектом первого порядка. Из результатов численного моделирования видно, что при уменьшении k_1 снижается колебательность системы (рис. 12 и 13), однако при сильном уменьшении k_1 процессы не соответствуют требованиям (рис. 15). Подходящим выбором является $k_1 = 0,5\mu/t_{\text{зап}}$.

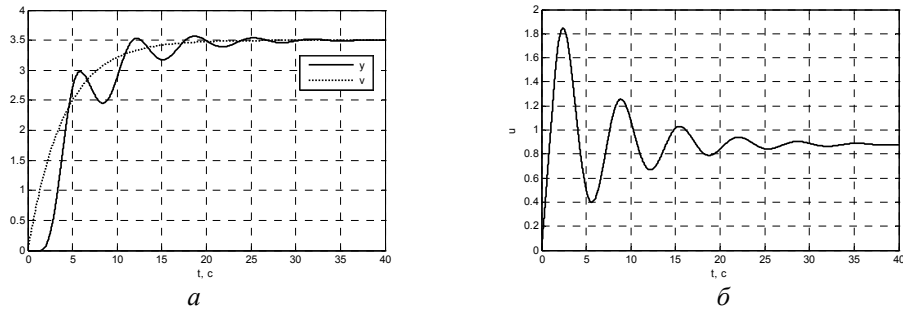


Рис. 12. Переходные процессы в системе управления объекта первого порядка при $k_1 = \mu / t_{\text{зап}}$:

a – по выходной величине y ; b – по управляющему воздействию u

Fig. 12. Transient processes in the first-order object control system at $k_1 = \mu / t_{\text{зап}}$:

a is the output signal y ; b is the actuating signal u

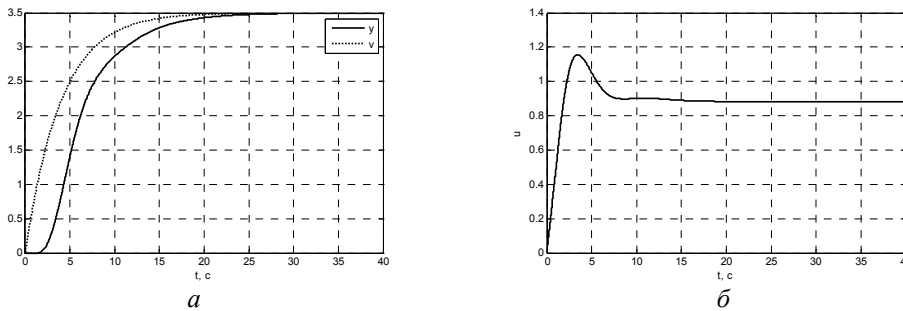


Рис. 13. Переходные процессы в системе управления объекта первого порядка при $k_1 = 0,5\mu / t_{\text{зап}}$:

a – по выходной величине y ; b – по управляющему воздействию u

Fig. 13. Transient processes in the first-order object control system at $k_1 = 0,5\mu / t_{\text{зап}}$:

a is the output signal y ; b is the actuating signal u

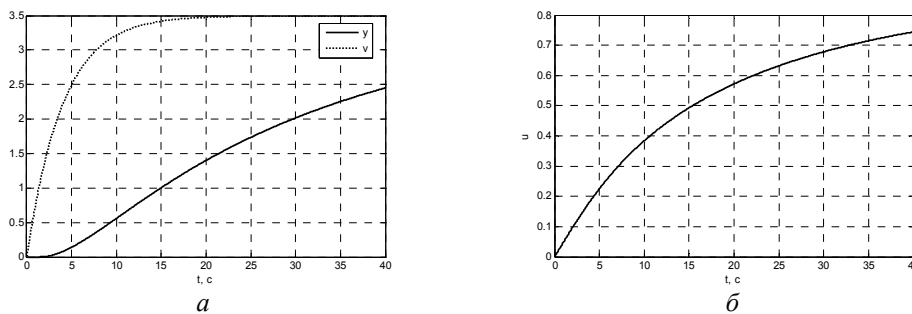


Рис. 14. Переходные процессы в системе управления объекта первого порядка при $k_1 = 0,05\mu / t_{\text{зап}}$:

a – по выходной величине y ; b – по управляющему воздействию u

Fig. 14. Transient processes in the first-order object control system at $k_1 = 0,05\mu / t_{\text{зап}}$:

a is the output signal y ; b is the actuating signal u

5.2. ДЛЯ ОБЪЕКТА ВТОРОГО ПОРЯДКА

На рис. 15–20 показаны процессы в системе управления объектом второго порядка, температура приводится в градусах Цельсия, однако при расчетах использовалась температура в кельвинах.

Из результатов численного моделирования видно, что при $d_1 = 2$, $\mu = 0,4$ с при уменьшении k_1 снижается колебательность системы (рис. 15 и 16), однако при сильном уменьшении k_1 процессы не соответствуют требованиям (рис. 17). Подходящим выбором является $k_1 = 0,5\mu / t_{зап}$. Также колебательность можно снижать путем увеличения параметра d_1 при $k_1 = 1$, $\mu = 0,4$ с (рис. 18 и 19). Из графиков на рис. 20 видно, что не следует уменьшать колебательность системы управления с помощью изменения параметра μ .

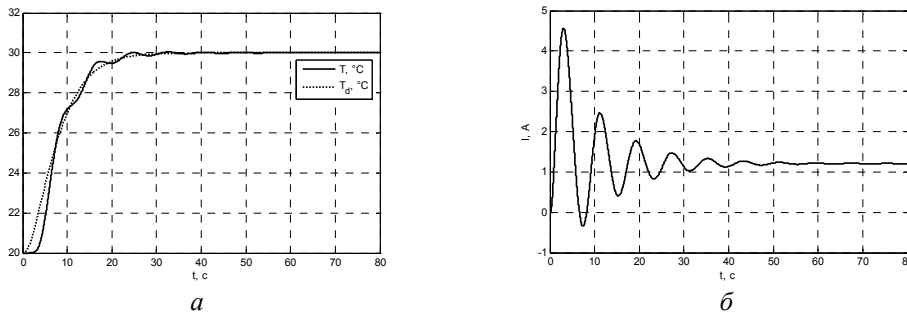


Рис. 15. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при $d_1 = 2$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = d_1\mu / t_{зап}$:

a – по температуре T (выходной величине); b – по току (управляющему воздействию)

Fig. 15. Transient processes in the second-order object control system at $d_1 = 2$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = d_1\mu / t_{зап}$:

a is temperature T processes (output signal); b is current processes (actuating signal)

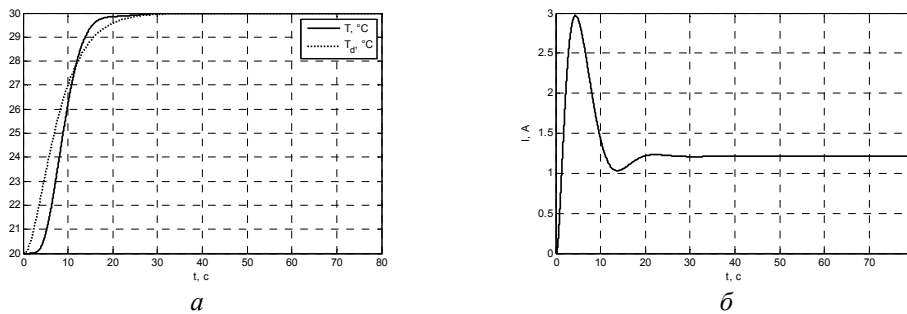


Рис. 16. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при $d_1 = 2$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = 0,5d_1\mu / t_{зап}$:

a – по температуре T (выходной величине); b – по току (управляющему воздействию)

Fig. 16. Transient processes in the control system of a second-order object at $d_1 = 2$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = 0,5d_1\mu / t_{зап}$:

a is temperature T processes (output); \bar{b} is current processes (actuating signal)

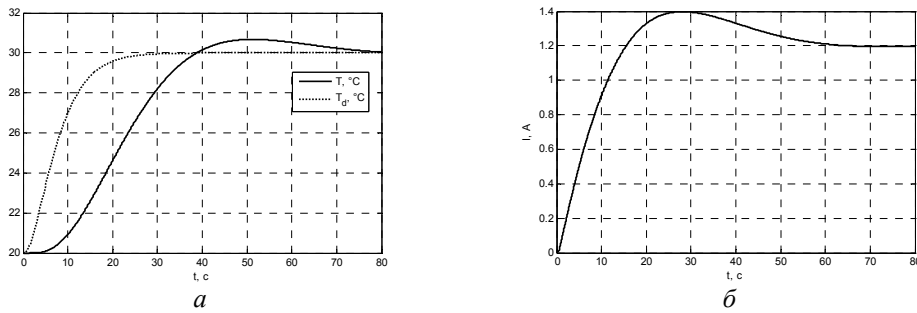


Рис. 17. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при $d_1 = 2$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = 0,05d_1\mu / t_{зап}$:

a – по температуре T (выходной величине); \bar{b} – по току (управляющему воздействию)

Fig. 17. Transient processes in the second-order object control system at $d_1 = 2$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = 0,05d_1\mu / t_{зап}$:

a is temperature T processes (output); \bar{b} is current processes (actuating signal)

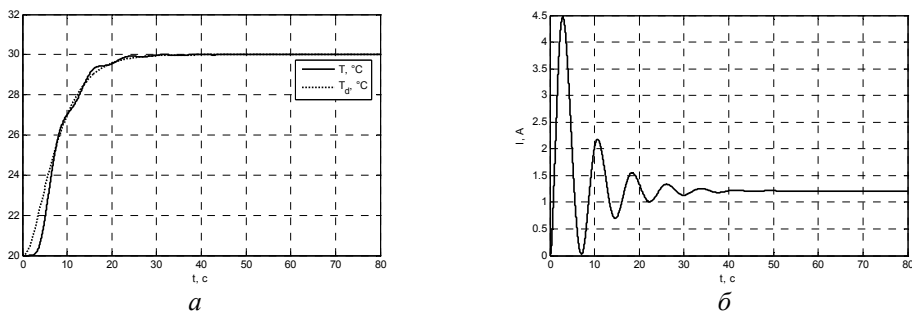


Рис. 18. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при $d_1 = k_1 t_{зап} / \mu$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = 1$:

a – по температуре T (выходной величине); \bar{b} – по току (управляющему воздействию)

Fig. 18. Transient processes in the second-order object control system at $d_1 = k_1 t_{зап} / \mu$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = 1$:

a is T temperature processes (output); \bar{b} is current processes (actuating signal)

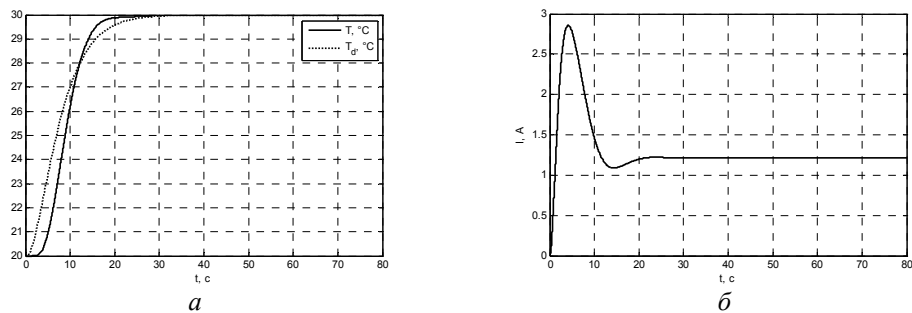


Рис. 19. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при $d_1 = 2k_1 t_{зап} / \mu$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = 1$:

a – по температуре T (выходной величине); \bar{b} – по току (управляющему воздействию)

Fig. 19. Transient processes in the second-order object control system at $d_1 = 2k_1t_{\text{зап}} / \mu$, $\mu = 0,4$ с, $k_1 = 1$:

a is T temperature processes (output); b is current processes (actuating signal)

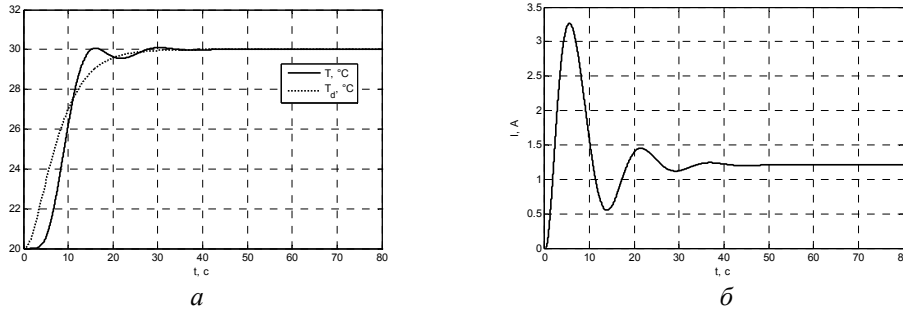


Рис. 20. Переходные процессы в системе управления объектом второго порядка при $d_1 = 2$, $\mu = 2k_1t_{\text{зап}} / d_1$, $k_1 = 1$:

a – по температуре T (выходной величине); b – по току (управляющему воздействию)

Fig. 20. Transient processes in the second-order object control system at $d_1 = 2$, $\mu = 2k_1t_{\text{зап}} / d_1$, $k_1 = 1$:

a is temperature T processes (output), b is current processes (actuating signal)

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам работы видно, что метод разделения движений может быть применен для расчета регулятора для нелинейных систем с запаздыванием даже в случаях, когда невозможно обеспечить степень разделения движений более или равную 10. Переходные процессы соответствуют требованиям (рис. 13, 16, 18, 19). Даны рекомендации по расчету параметра k_1 для регулятора для объекта первого и второго порядка и по расчету параметра d_1 для объекта второго порядка. При этом не рекомендуется регулировать качество переходных процессов изменением параметра μ (см. рис. 20).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность применения критерия Михайлова для оценки устойчивости подсистемы быстрых движений. Выведены формулы для расчета параметров регулятора для нелинейных объектов первого и второго порядка с запаздыванием с помощью метода разделения движений. Синтезированы регуляторы для нелинейного объекта первого порядка с запаздыванием и второго порядка с запаздыванием с помощью метода разделения движений с применением критерия Михайлова и критерия Найквиста. Выполнено сравнение параметров регулятора, полученных при использовании критерия Найквиста и критерия Михайлова. Проведено численное моделирование. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании самонастраивающихся регуляторов для объектов с запаздыванием (например, для элемента Пельтье).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупроводниковый термостат для лабораторных исследований «ТС-20» / И.П. Егорова, Ю.И. Иванов, С.Н. Колесников, Г.И. Сидоров // Известия ТРТУ. – 2002. – № 6 (29). – С. 121–123.
2. Опыт разработки и применения источников питания для систем автономного энергообеспечения / В.М. Алашкин, Ю.А. Батраков, Б.И. Туманов, А.Н. Кукушкин, П.И. Николенко, С.Д. Севрук, В.Г. Удальцов // Электрохимическая энергетика. – 2006. – Т. 6, № 3. – С. 160–161.
3. Аксенов Е.А., Юркевич В.Д. Синтез каскадной системы управления для преобразователя Кука // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 3 (81). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-7-20.
4. Shtein D.A., Klassen S.V., Klassen T.S., Konyakhin V.S. Multiport push-pull/S3R/S4R DC-DC converter for spacecraft power systems // 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Chemal, Russia, 2020. – P. 400–406. – DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153547.
5. Гринкевич В.А. Синтез регулятора температуры для термостолка на основе элемента Пельтье // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 1 (78). – С. 55–74. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-55-74.
6. Парфенов А. Температурный профиль конвекционной пайки. Что это такое? // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 2 (30). – С. 29–30.
7. Юркевич В.Д. Многоканальные системы управления. Синтез линейных систем управления с разнотемповыми процессами: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 183 с.
8. Востриков А.С., Французова Г.А., Гаврилов Е.Б. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования: учебное пособие. – 5-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 476 с.
9. Бесекецкий В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления. – 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
10. Лускань О.А. Механизация и автоматизация производственных процессов на основе применения импульсных конвейеров с роликовым настилом // Механика XXI века. – 2010. – № 9. – С. 59–63.
11. Гринкевич В.А. Синтез регулятора тока для термостолка на основе элемента Пельтье // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 33–52. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-33-52.
12. Юркевич В.Д. Расчет типовых регуляторов для нелинейных систем с запаздыванием методом разделения движений // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1 (25). – С. 122–126.
13. Юркевич В.Д. Синтез нелинейных систем с ШИМ в канале управления на основе метода разделения движений // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1 (25). – С. 127–130.
14. Колегов М.А., Юркевич В.Д. Расчет параметров ПИ-регулятора для неаффинной по управлению системы // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 2 (64). – С. 13–18.
15. Жмудь В.А. Численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim: новые структуры и методы: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 259 с. – ISBN 978-5-7782-3063-7.
16. Оборудование. Технологии. Разработки: web-сайт. – URL: <http://mypractic.ru/> (дата обращения: 06.03.2021).
17. Гринкевич В.А. Идентификация устройства на основе элемента Пельтье методом наименьших квадратов // Доклады АН ВШ РФ. – 2020. – № 1–2 (46–47). – С. 17–27. – DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-17-27.

Гринкевич Владимир Анатольевич, научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агроботехнологий Российской академии наук. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления. Имеет 13 публикаций, в том числе 5 материалов конференций. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

Grinkevich Vladimir A., researcher in the Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Science. The main field of his scientific research is the automation control theory. He has 13 scientific publications including 5 conference proceedings. E-mail: grinkevich-vova@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60

Controller design by the motion separation method with applying stability criteria for non-linear objects with transport delays*

V.A. GRINKEVICH

Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies Russian Academy of Science, PO Box 463, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Novosibirsk District, 630501, Russian Federation
grinkevich-vova@mail.ru

Abstract

Controllers and feedback are applied for performing many technical tasks, for example, maintaining the desired temperature stabilization in the thermostat and speed electric motor stabilization. Different methods such as the time-scale separation method, the frequency-response design method, and the Ziegler–Nichols method are applied to design controllers. The Ziegler–Nichols method does not provide the required transient process quality. The Smith predictor is sometimes applied to control objects with a transport delay. However, it may be difficult to apply the Smith predictor when a mathematical model is not fully known. There is a paper where the application of the motion separation method with a delay is considered. However, the calculation method proposed in that work requires solving a system of four nonlinear equations for a second-order object. Therefore, in this paper, we investigate the possibility of a simpler method for calculating the controller, namely, the possibility of using the Mikhailov criterion in the synthesis of a controller by the motion separation method for nonlinear objects with a delay. Also, the application of the Nyquist stability criterion with a simpler than the proposed earlier calculation procedure is considered in the paper. The values of the regulator coefficients obtained using the Nyquist criterion and the Mikhailov criterion are compared. The Mikhailov criterion and the Nyquist criterion are applied to estimate the stability of the fast motions subsystem. The derivation of formulas to calculate the parameters of the controller designed by the motion separation method for first-order non-linear objects with transport delays and second-order non-linear objects with transport delays with the use of the Mikhailov criterion is also considered in the paper. Transient processes are studied by numerical simulation. Transient processes plots are also given. The parameters of the controller that are needed to improve the performance of transient processes in the presence of a delay are found. The Peltier element, an aircraft strength test stand, a thermostat, and equipment for metal rolling are non-linear control objects with a transport delay. The Mikhailov hodographs for objects with a transport delay are presented.

Keywords: object with transport delay, non-linear object, motion separation method, Mikhailov criterion, Mikhailov hodograph, Nyquist criterion, controller, Peltier element

* Received 23 September 2020.

REFERENCES

1. Egorova I.P., Ivanov Yu.I., Kolesnikov S.N., Sidorov G.I. Poluprovodnikovyi termostat dlya laboratornykh issledovaniy "TC-20" [Semiconductor thermostat for laboratory researches "TC-20"]. *Izvestiya TRTU = Izvestiya TSURE*, 2002, no. 6 (29), pp. 121–123.
2. Alashkin V.M., Batrakov Yu.A., Tumanov B.I., Kukushkin A.N., Nikolenko P.I., Sevruk S.D., Udaltsov V.G. Opyt razrabotki i primeneniya istochnikov pitaniya dlya sistem avtonomnogo energosnabzheniya [Experience in the development and application of power supplies for autonomous power supply systems]. *Elektrokhimicheskaya energetika = Electrochemical Energetics*, 2006, vol. 6, no. 3, pp. 160–161.
3. Aksenov E.A., Yurkevich V.D. Sintez kaskadnoi sistemy upravleniia dlia preobrazovatel'ia Kuka [Design of cascaded control system for a Cuk converter]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (81), pp. 7–20. DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-7-20.
4. Shtein D.A., Klassen S.V., Klassen T.S., Konyakhin V.S. Multiport push-pull/S3R/S4R DC-DC converter for spacecraft power systems. *2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Chemal, Russia, 2020, pp. 400–406. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153547.
5. Grinkevich V.A. Sintez regul'yatora temperatury dlya termostolika na osnove elementa Pel't'e [Temperature controller design for the temperature controlled stage based on the Peltier element]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 1 (78), pp. 55–74. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-55-74.
6. Parfenov A. Temperaturnyi profil' konveksionnoi paiki. Chto eto takoe? [Thermal profile of convection soldering. What is it?]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti = Technologies in Electronic Industry*, 2009, no. 2 (30), pp. 29–30.
7. Yurkevich V.D. *Mnogokanal'nye sistemy upravleniya. Sintez lineinykh sistem upravleniya s raznotempovymi protsessami* [Design of linear control systems with multi-time scale motions]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 183 p.
8. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A., Gavrilov E.B. *Osnovy teorii nepreryvnykh i diskretnykh sistem regulirovaniya* [The foundations of continuous and discrete control system theory]. 5th ed., revised and augmented. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 476 p.
9. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automation control theory]. 3rd ed. Moscow, Nauka Publ., 1975. 768 p.
10. Luskan' O.A. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov na osnove primeneniya impul'snykh konveierov s rolikovym nastilom [Mechanization and automation of production processes based on the use of impulse conveyors with roller decks]. *Mekhaniki XXI veku = Mechanical engineers to XXI century*, 2010, no. 9, pp. 59–63.
11. Grinkevich V.A. Sintez regul'yatora toka dlya termostolika na osnove elementa Pel't'e [Current controller design for temperature controlled stage based on Peltier element]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 33–52. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-33-52.
12. Yurkevich V.D. Raschet tipovykh regul'yatorov dlya nelineinykh sistem s zapazdyvaniem metodom razdeleniya dvizhenii [PI and PID controller design for nonlinear systems with time delay via time-scale separation]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 1 (25), pp. 122–126.
13. Yurkevich V.D. Sintez nelineinykh sistem s ShIM v kanale upravleniya na osnove metoda razdeleniya dvizhenii [Design of nonlinear control systems with pulse-width modulation via time-scale separation]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 1 (25), pp. 127–130.

14. Kolegov M.A., Yurkevich V.D. Raschet parametrov PI-regulyatora dlya neaffinnoi po upravleniyu sistemy [PI-controller design for nonaffine-in-control system]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 2 (64), pp. 13–18.

15. Zhmud' V.A. *Chislennaya optimizatsiya zamknytykh sistem avtomaticheskogo upravleniya v programme VisSim: novye struktury i metody* [Numerical optimization of locked system of automatic control in software VisSim: new structures and methods]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 259 p. ISBN 978-5-7782-3063-7.

16. *Oborudovanie. Tekhnologii. Razrabotki* [Equipment. Technologies. Developments]. Website. Available at: <http://mypractic.ru/> (accessed 06.03.2021).

17. Grinkevich V.A. Identifikatsiya ustroystva na osnove elementa Pel'te metodom naimen'shikh kvadratov [The identification of a device based on a Peltier element by the least squares method]. *Doklady Akademii nauk vyshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 17–27. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-17-27.

Для цитирования:

Гринкевич В.А. Синтез регулятора для нелинейных объектов с запаздыванием методом разделения движений с применением критериев устойчивости // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 39–60. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60.

For citation:

Grinkevich V.A. Sintez regulyatora dlya nelineinykh ob"ektov s zapazdyvaniem metodom razdeleniya dvizhenii s primeneniem kriteriev ustoichivosti [Controller design by the motion separation method with applying stability criteriev for non-linear objects with transport delays]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh* = *Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 39–60. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.942: 621.316:620.91

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-61-72

О разработке программно-аппаратного комплекса моделирования электросетевого контроллера и объектов микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии в сетях НН 0,4 кВ*

**А.С. ГРИЦАЙ^a, Е.В. ЧЕБАНЕНКО^b, В.И. ПОТАПОВ^c,
Е.Г. АНДРЕЕВА^d, Р.Н. ХАМИТОВ^e, И.В. ЧЕРВЕНЧУК^f**

644050, РФ, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет

^a aleksandr.gritsay@gmail.com ^b evchebanenko@gmail.com ^c ivt@omgtu.ru

^d el.tech.omgtu@gmail.com ^e el.tech.omgtu@gmail.com ^f aleksandr.ivt@omgtu.ru

В статье рассмотрены вопросы подключения объектов микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) к электрическим сетям низкого напряжения (НН) 0,4 кВ. Такой способ подключения позволит использовать объекты микрогенерации в качестве сетевых источников энергии, и при этом неиспользованная электрическая энергия, вырабатываемая с помощью объектов микрогенерации, может поставляться в сеть низкого напряжения 0,4 кВ. Предлагаются способы имитационного моделирования процессов распределения электрической энергии в системе электроснабжения с объектами микрогенерации; сформулированы требования к электросетевому контроллеру, используемому для обеспечения подключения объектов микрогенерации в сеть низкого напряжения. Проанализированы возникающие в связи с этим проблемы и предложены пути их решения. Предлагаемые способы разработки программно-аппаратных решений с применением современных методов имитационного моделирования процессов генерации и распределения электрической энергии на основе быстрого прототипирования в среде Matlab Simulink позволяют провести натурные эксперименты с целью моделирования процессов, протекающих в электрических сетях низкого напряжения 0,4 кВ с использованием объектов микрогенерации просьюмеров.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, объекты микрогенерации, система электроснабжения, система накопления энергии, просьюмеры, сетевые контроллеры, сети низкого напряжения, быстрое прототипирование, Simulink

* Статья получена 21 сентября 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире динамично развиваются направления, связанные с энергетикой, на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), это вызвано с ограниченностью природных углеводородных ресурсов [1]. Так с принятием Кийотского протокола, а позже Парижского соглашения (в рамках рамочной конвенции ООН об изменении климата) была определена динамика добычи и использования углеводородных ресурсов. Целью соглашения согласно 2-й статье является «активизировать осуществление» Рамочной конвенции ООН по изменению климата, в частности, удерживать рост глобальной средней температуры «намного ниже» 2°C и «приложить усилия» для ограничения роста температуры величиной $1,5^{\circ}\text{C}$ относительно средних значений температуры окружающей среды в 1990 году. В связи с этим возникает два основных направления в развитии потенциала имеющейся энергетической инфраструктуры:

- повышение эффективности использования существующих электроэнергетических систем;

- интеграция ВИЭ в традиционные электроэнергетические системы.

С целью повышения эффективности использования электроэнергетических систем применяются различные подходы, основные цели которых – повышение пропускной способности, сглаживание пиков потребления электрической энергии, совершенствование механизмов управления электроэнергетическими системами. Так, в 2019 году в России был запущен рынок управления спросом на электроэнергию, который активно развивается путем разработки программно-аппаратных комплексов и с помощью методов управления технологическими процессами производств [2]. В части интеграции ВИЭ в традиционные электроэнергетические системы вырабатываются новые механизмы интеграции децентрализованной генерации на основе возобновляемых источников энергии, внедряются интеллектуальные сети Smart Grids [3, 4], а это значит, что в электроэнергетической системе возникают двунаправленные потоки энергии как от традиционных источников энергии к потребителю, так и от микрогенерации (на основе ВИЭ) потребителя в сеть НН 0,4 кВ. В шестидесятые годы прошлого столетия единая энергетическая система нашей страны считалась сложнейшим кибернетическим объектом, воздвигнутым человеческими усилиями, с множеством управляющих воздействий и обратных связей. В настоящее время сложность такой кибернетической системы обусловлена введением новых механизмов управления и интеграции децентрализованных источников генерации на основе ВИЭ и двунаправленных потоков энергии. Всё это способствует развитию новых способов управления и диспетчеризации двунаправленных потоков энергии, применению систем на основе искусственного интеллекта и машинного обучения с целью повышения надежности, качества и пропускной способности существующих электроэнергетических систем.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В России с принятием ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об электроэнергетике” в части микрогенерации 28 декабря 2019 года», принятого Государственной думой 11 декабря 2019 года и одобренного Советом

Федерации 23 декабря 2019 года, для отечественной энергетики возникает ряд новых задач для всех субъектов оптового и розничного рынка электрической энергии и мощности, связанных с технологическим присоединением просьюмеров и обеспечением их работы. Просьюмер – это потребитель электрической энергии, который может управляемым образом осуществлять не только потребление, но и производство (например, с помощью микрогенерации на основе ВИЭ) и хранение электрической энергии. Законодательно определена максимальная мощность объектов микрогенерации для одного домохозяйства, и она не может превышать 15 кВт.

Для сетевых компаний появляются новые задачи, связанные с вопросами технологического присоединения объектов микрогенерации на основе ВИЭ просьюмеров к распределительным сетям НН 0,4 кВ. В настоящее время ПАО «Россети» совместно с АО «Федеральный испытательный центр» и Сколковским институтом науки и технологий ведут работу по моделированию процессов в распределительных сетях НН 0,4 кВ на предмет устойчивой и бесперебойной работы распределительных сетей с учетом присоединенных объектов микрогенерации просьюмеров, а также разрабатывают стандарт на шкаф с присоединения таких объектов микрогенерации и электросетевой контроллер. Полученный функционал обеспечит решение следующих задач:

- контроль качества электрической энергии, вырабатываемой просьюмерами;
- интеграция объектов микрогенерации на основе ВИЭ в сетях НН 0,4 кВ;
- решение задачи параллельной работы силового оборудования различных производителей, инверторов, солнечных и ветроэлектростанций различных производителей.

Кроме того, одной из основных задач является задача по поддержанию качества электрической энергии [5] в сетях 0,4 кВ, поскольку технологически этот параметр обеспечивается сетевыми компаниями [6].

Для гарантирующих поставщиков возникают новые задачи, связанные с построением прогностических моделей и методов краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии для повышения эффективности работы на оптовом рынке электрической энергии и мощности [7]. Такие модели и методы должны учитывать объемы выработки электрической энергии объектами микрогенерации просьюмеров с учетом неопределенностей как режимов работы самих просьюмеров, так и метеорологических факторов [8]. В случае небольшого количества просьюмеров их работа окажет незначительные воздействия на энергосистему. Однако в случае если их количество будет исчисляться сотнями и тысячами, необходимо будет с достаточной точностью определять объемы их выработки / потребления электрической энергии в общем балансе потоков энергии. Кроме того, необходимо обеспечить контроль качества и бесперебойную работу распределительных сетей НН 0,4 кВ с подключенными объектами микрогенерации на основе ВИЭ. Также в случае аварийных режимов работы либо проводимых плановых ремонтных работ на участках распределительных сетей 0,4 кВ, очевидно, может потребоваться отключение децентрализованных объектов микрогенерации просьюмеров, чтобы полностью обесточить линию электропередач НН 0,4 кВ. Все указанные факты влияют на специфические требования к задачам

управления системами распределенной микрогенерации к изменению существующих требований, регламентов работы и поиску новых схемотехнических решений.

Известно, что одной из важнейших задач при построении сетей НН 0,4 кВ, включающей объекты микрогенерации, в том числе на основе ВИЭ с учетом и без учета системы накопления энергии (СНЭ), является защита самих объектов микрогенерации и СНЭ в случае возможных аварийных режимов. При этом возникает большое количество вопросов к построению электроэнергетических систем с различной топологией – радиальной и кольцевой структуры, включающей объекты микрогенерации на основе ВИЭ и разработки и применение специализированных систем автоматики, управления и релейной защиты. Одна из основных проблем состоит в том, что традиционные схемы защиты от перегрузок не способны работать с силовой электроникой объектов микрогенерации, поскольку применяемые схемы защиты от перегрузок не способны отличить ток короткого замыкания (КЗ) микрогенерации от величины тока рабочего режима с применением ограничителей тока КЗ. Например, при использовании ограничителей тока ток короткого замыкания устанавливается равным двум номинальным значениям. Без ограничителя тока ток КЗ обычно в 10 раз больше, чем значение номинального тока. Именно поэтому широко используемые схемы защиты от сверхтоков требуют доработки при включении объектов микрогенерации [9, 10]. Другая известная проблема [11] заключается в том, что существующие средства защиты слишком медленны с точки зрения времени отклика схемы защиты в аварийных режимах работы. Например, применяемые схемы защиты, в которых используются токоограничительные перемычки, имеют время отклика до нескольких секунд. Если ток короткого замыкания будет удерживаться в течение такого времени в распределительных сетях 0,4 кВ, включающих объекты микрогенерации на основе ВИЭ, это может привести к серьезным повреждениям управляющей силовой электроники инвертора, входящего в состав объектов микрогенерации.

2. ПРОТОТИП МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ МИКРОГЕНЕРАЦИИ

Для построения имитационных моделей для целей моделирования может быть использовано программное обеспечение MATLAB Simulink. Это общепризнанное научным и инженерным сообществами программное обеспечение, которое применяется при моделировании и разработке статических и динамических систем различного уровня сложности. Опубликовано значительное количество работ, посвященных вопросам моделирования научными коллективами объектов микрогенерации, в том числе и гибридных систем на основе энергии воды, солнца и ветра [12–14]. Научным сообществом разработаны и представлены подробные Simulink-модели ветрогенераторов [15, 16], описывающие их динамическое поведение, а также детализированные модели, которые учитывают их конструктивные особенности [17] и механические нагрузки [18]. Предложены гибридные модели с фотоэлектрическими источниками и ветряными турбинами для изучения процесса

проектирования цифровых систем управления [19], модели инверторов различного уровня сложности [20]. Кроме того, на основе Simulink возможно проведение исследований надежности объектов микрогенерации [21], а также разработка имитационных моделей [22], возможна программная и программно-аппаратная симуляция, а это позволяет моделировать различные сценарии работы объектов микрогенерации, анализировать режимы работы СНЭ, моделировать возможные аварийные и предаварийные режимы работы системы, определять логику работы электросетевого контроллера. Программно-аппаратное моделирование предполагает запуск и отладку имитационных моделей в режиме реального времени. При этом необходимо «разнести» элементы Simulink-моделей электросетевого контроллера (РС-1) и объектов микрогенерации (РС-2) (рис. 1) и осуществить запуск на рабочих станциях в режиме реального времени.



Рис. 1. Программно-аппаратное моделирование

Fig. 1. Software-hardware modeling

Функциональные возможности Matlab Simulink позволяют осуществлять взаимодействие с внешним оборудованием в режиме реального времени с использованием различных интерфейсов подключения. При этом возможна отладка работы логики электросетевого контроллера совместно с лабораторными стендами (физические модели), реализующими сеть НН 0,4 кВ и содержащими объекты микрогенерации, включающие ВИЭ с учетом и без учета СНЭ, с разнородной нагрузкой.

Кроме того, с использованием программных средств Simulink возможно осуществлять управление внешним оборудованием. Это дает возможность описать процесс моделирования объектов микрогенерации формально и в перспективе использовать полученные сценарии моделирования при тестировании электросетевого контроллера, но уже в аппаратном исполнении (рис. 2).

Каждый объект или группа объектов Simulink-модели сгенерированы в виде кода языков программирования С, С++ и скомпилированы в исполняемый программный файл. Такой подход позволяет обеспечить эффективную поддержку модульной и расширяемой идеологии в случае расширения функциональных возможностей (рис. 3).

Для целей моделирования объектов микрогенерации необходимо выполнение следующих основных этапов.

А. Разработка модуля программного комплекса для ЭВМ, описывающего объект микрогенерации:

- 1) разработка Simulink-модели объекта микрогенерации;
- 2) генерация С-кода объекта микрогенерации;
- 3) конвертация в библиотеку языка С.

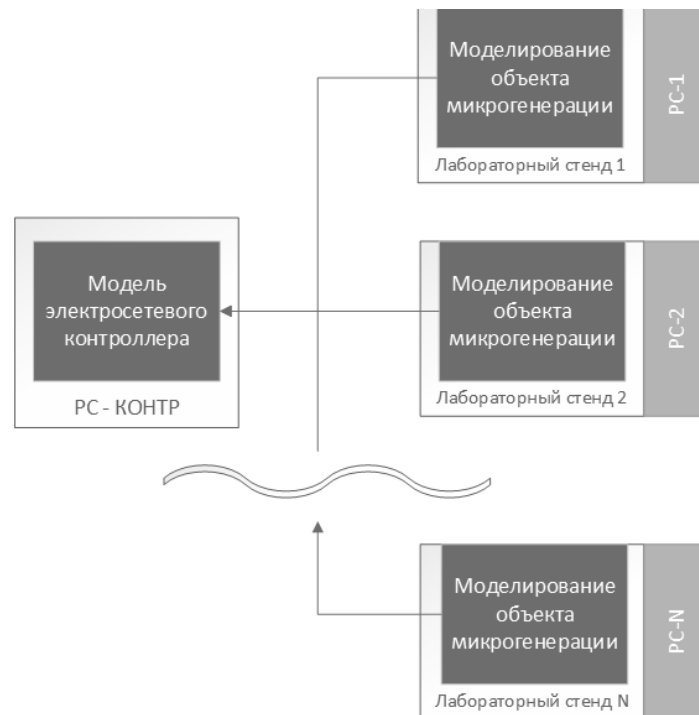


Рис. 2. Программно-аппаратное моделирование объектов микрогенерации с учетом различных возможных композиций

Fig. 2. Software-hardware modeling of microgeneration objects adjusted for various possible compositions

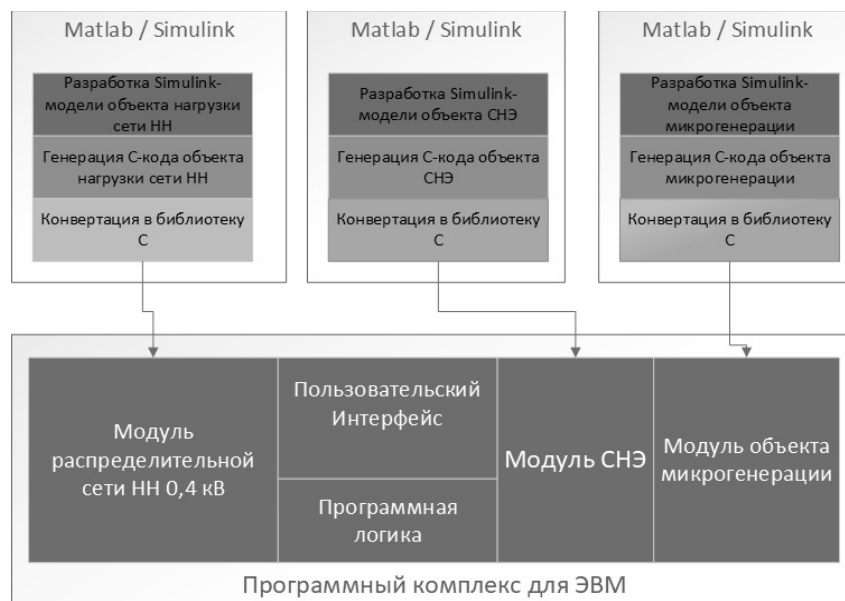


Рис. 3. Прототип модульной архитектуры при моделировании объектов микрогенерации на основе ВИЭ с учетом и без учета СНЭ

Fig. 3. A prototype of the module architecture in designing microgeneration objects based on RES with and without regard for EAS

В. Разработка модуля программного комплекса для ЭВМ, описывающего объект СНЭ:

- 1) разработка Simulink-модели объекта СНЭ;
- 2) генерация С-кода объекта СНЭ;
- 3) конвертация в библиотеку С.

С. Разработка модуля программного комплекса для ЭВМ, описывающего объект нагрузки сети НН:

- 1) разработка Simulink-модели объекта нагрузки распределительной сети НН 0,4 кВ;
- 2) генерация С-кода объекта нагрузки распределительной сети НН 0,4 кВ;
- 3) конвертация в библиотеку С.

Д. Разработка логики взаимодействия модулей программного комплекса, вычислительных алгоритмов и представления результатов.

Е. Разработка пользовательского интерфейса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к моделированию процессов объектов микрогенерации на основе ВИЭ с использованием программно-аппаратной симуляции, в том числе функций электросетевого контроллера, позволит осуществить независимую разработку модулей программного комплекса, оперативную разработку новых библиотек, моделирующих объекты микрогенерации, СНЭ, разноплановую нагрузку, а также сами функции электросетевого контроллера, обеспечить подключение и разработку пользователями собственных модулей в случае такой необходимости.

Программно-аппаратная симуляция с использованием компилируемых модулей – объектов СНЭ – позволит обеспечить функциональную возможность сопряжения с компьютерной имитационной моделью электрической сети 0,4 кВ, включающей различные задаваемые композиции микрогенерации: СЭС–ВЭС, СЭС–СЭС, ДЭС–СЭС, ДЭС–СЭС–СНЭ и др. Программный комплекс также обеспечит возможность обработки внешних сигналов, что реализуется путем внешнего подключения преобразователей физических сигналов, имеющих требуемую сертификацию, и позволит осуществить беспрепятственный переход при отладке программы с математической модели на физическую.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Buchholz B.M., Styczynski Z.* Smart Grids : fundamentals and technologies in electric power systems of the future. – Heidelberg; New York: Springer, 2020. – 408 p.
2. *Третьяков Е.А., Малышева Н.Н.* Управление спросом активных потребителей в распределительных электрических сетях // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 190–202.
3. Smart grid digitalization in Germany by standardized advanced metering infrastructure and green button / J. Meister, N. Ihle, S. Lehnhoff, M. Usler // Application of Smart Grid Technologies. – London; San Diego: Academic Press, 2018. – P. 347–371.
4. *Манусов В.З., Хасанзода Н., Матренин П.В.* Применение методов искусственного интеллекта в задачах управления режимами электрических сетей Smart Grid. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 240 с.

5. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

6. СТО 34.01-39.3-003–2018. Регламент управления качеством электрической энергии в распределительных электрических сетях дочерних зависимых обществ ПАО «Россети»: дата введения 03.05.2018. – М.: ПАО «Россети», 2018. – (Стандарт организации).

7. The method of short-term forecast electricity load with combined a sinusoidal function and an artificial neural network / A. Gritsay, V. Makarov, R. Khamitov, A. Tatevosyan, S. Gritsay // *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. – St. Petersburg, Moscow, 2019. – P. 523–526. – DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656796.

8. Short-term forecast methods of electricity generation by solar power plants and its classification / D.A. Tyunkov, A.S. Gritsay, V.I. Potapov, R.N. Khamitov, A.V. Blohin, L.K. Kondratukova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1260, iss. 5. – P. 052033.

9. Yang Z., Chai Y. A survey of fault diagnosis for onshore grid-connected converter in wind energy conversion systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 66. – P. 345–359.

10. Zhang F., Mu L. A fault detection method of microgrids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the PQ control strategy // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2019. – Vol. 10 (5). – P. 4816–4826.

11. Investigate dynamic and transient characteristics of microgrid operation and develop a fast-scalable-adaptable algorithm for fault protection system / D.M. Bui, K.-Y. Lien, S.-L. Chen, Y.-C. Lu, C.-M. Chan, Y.-R. Chang // *Electric Power Systems Research*. – 2015. – Vol. 120. – P. 214–233.

12. Mathematical modeling of hybrid renewable energy system: a review on small hydro-solar-wind power generation / B. Bhandari, S.R. Poudel, K.-T. Lee, S.-H. Ahn // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. – 2014. – Vol. 1, N 2. – P. 157–173.

13. Modeling of solar wind hybrid renewable energy sources in Simulink / S.C. Sahoo, B. Panda, R. Dash, B. Panda, S. Kar // *Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems, ICSCS 2015*. – New Delhi: Springer, 2016. – Vol. 1. – P. 939–947.

14. Зубакин В.А., Карнаухов М.Н., Стариннов С.А. Проектирование, строительство и эксплуатация солнечных и ветровых электростанций: учебное пособие. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2019. – 163 с.

15. Moussavi S.Z., Atapour R. Dynamic modelling and control of doubly fed induction generator variable speed wind turbine // *Computational Intelligence and Information Technology, CIIT 2011*. –Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. – P. 78–86.

16. Suresh A., Resmi R., Vanitha V. Mathematical model of brushless doubly fed induction generator based wind electric generator // *Power Electronics and Renewable Energy Systems*. – India: Springer, 2015. – P. 1477–1487.

17. Kumar A., Munda J., Singh G. Wind-driven stand-alone six-phase self-excited induction generator transients under different loading conditions // *Electrical Engineering*. – 2015. – Vol. 97. – P. 87–100.

18. System dynamic modelling of three different wind turbine gearbox designs under transient loading conditions / H. Al-Hamadani, T. An, M. King, H. Long // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2017. – Vol. 18, N 11. – P. 1659–1668.

19. Chettibi N., Mellit A. Study on control of hybrid photovoltaic-wind power system using Xilinx system generator // *Solar Photovoltaic Power Plants*. – Singapore: Springer, 2019. – P. 97–120.

20. Muthukumar R., Balamurugan P. A model predictive controller for improvement in power quality from a hybrid renewable energy system // *Soft Computing*. – 2019. – Vol. 23 (8). – P. 2627–2635.

21. Song H., De T. Research on maximum wind energy capturing of doubly fed induction wind generator based on fuzzy control technology // *Future Communication, Computing, Control and Management*. – 2012. – Vol. 141. – P. 43–48.

22. Khan M.J., Mathew L. Fuzzy logic controller-based MPPT for hybrid photo-voltaic/wind/fuel cell power system // *Neural Computing and Applications*. – 2019. – Vol. 31, N 10. – P. 6331–6344.

Грицай Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника», заведующий кафедрой «Информатика и вычислительная техника» Омского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: прогнозирование электропотребления / выработки электрической энергии GRID систем, математическое моделирование в анализе данных. E-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com

Чебаненко Евгений Владимирович, старший преподаватель кафедры «Информатика и вычислительная техника» Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика запорно-регулирующей арматуры. E-mail: evchebanenko@gmail.com

Потапов Виктор Ильич, доктор технических наук, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника». Основное направление научных исследований – разработка моделей, алгоритмов и программного обеспечения для решения оптимизационных задач противоборства технических систем в конфликтных ситуациях. E-mail: ivt@omgtu.ru

Андреева Елена Григорьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника». Основное направление научных исследований – моделирование электромагнитных процессов электротехнических устройств. E-mail: el.tech.omgtu@gmail.com

Хамитов Рустам Нуриманович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника». Основное направление научных исследований – повышение эффективности электротехнических комплексов и систем. E-mail: ivt@omgtu.ru

Червенчук Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника» Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование в анализе данных. E-mail: ivt@omgtu.ru

Gritsay Alexander S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Informatics and Computing Technology”, Head of the Department of “Informatics and Computer Engineering” of the Omsk State Technical University. The main directions of research: predicting power consumption / generating electrical energy GRID systems, mathematical modeling in data analysis. E-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com

Chebhangenko Evgeny V., Senior Lecturer, Department of Informatics and Computer Engineering, Omsk State Technical University. The main direction of scientific research is the diagnosis of shut-off-regulating reinforcement. E-mail: evchebanenko@gmail.com

Potapov Viktor I., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Informatics and Computing Technique”. The main direction of scientific research is the work of models, algorithms and software to solve the optimization tasks of the confrontation of technical systems in conflict situations. E-mail: ivt@omgtu.ru

Andreeva Elena G., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Electrical Technique”. The main direction of scientific research is modeling electromagnetic processes of electrical devices. E-mail: el.tech.omgtu@gmail.com

Khamitov Rustam N., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Electrical Technique”. The main direction of scientific research is to increase the efficiency of electrical complexes and systems. E-mail: ivt@omgtu.ru

Chervenчук Igor V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Informatics and Computer Engineering” Omsk State Technical University. The main directions of scientific research are mathematical modeling in data analysis. E-mail: ivt@omgtu.ru

On the development of a software and hardware complex for modeling a power grid controller and microgeneration facilities based on renewable energy sources in LV 0,4 kV networks*

A.S. GRITSAY^a, E.V. CHEBANENKO^b, V.I. POTAPOV^c, E.G. ANDREEVA^d,
R.N. KHAMITOV^e, B.V. CHERVENCHUK^f

Omsk State Technical University, 11 Prospect Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

^a alexandr.gritsay@gmail.com ^b evchebanenko@gmail.com ^c ivt@omgtu.ru

^d el.tech.omgtu@gmail.com ^e el.tech.omgtu@gmail.com ^f alexandr.ivt@omgtu.ru

Abstract

The article discusses the issues of connecting microgeneration facilities based on renewable energy sources (RES) to electric networks of low voltage (LV) 0,4 kV. This method of connection will allow the use of microgeneration facilities as network sources of energy, and at the same time unused electrical energy generated by micro-generation facilities can be supplied to a low-voltage network of 0,4 kV. Methods of simulation modeling of the processes of electrical energy distribution in the power supply system with microgeneration objects are proposed; the requirements for the power grid controller used to ensure the connection of micro-generation facilities to the low voltage network are formulated. The problems arising in connection with this are analyzed and the ways of their solution are offered. The proposed methods for the development of software and hardware solutions using modern methods of simulation of electrical energy generation and distribution based on rapid prototyping in the Matlab Simulink environment make it possible to carry out field experiments in order to simulate the processes occurring in 0,4 kV low voltage electrical networks using microgeneration objects prosumers.

Keywords: renewable energy sources, microgeneration facilities, power supply system, energy storage system, prosumers, network controllers, low voltage networks, rapid prototyping, Simulink

REFERENCES

1. Buchholz B.M., Styczynski Z. *Smart Grids : fundamentals and technologies in electric power systems of the future*. Heidelberg, New York, Springer, 2020. 408 p.
2. Tretyakov E.A., Malysheva N.N. Upravlenie sprosom aktivnykh potrebiteli v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh [Managing the demand of active consumers in distribution electric networks]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 190–202. (In Russian).
3. Meister J., Ihle N., Lehnhoff S., Uslar M. Smart grid digitalization in Germany by standardized advanced metering infrastructure and green button. *Application of Smart Grid Technologies*. London, San Diego, Academic Press, 2018, pp. 347–371.
4. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Matrenin P.V. *Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta v zadachakh upravleniya rezhimami elektricheskikh setei Smart Grid* [Application of artificial intelligence methods in the problems of controlling the modes of electric networks Smart Grid]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 240 p.
5. 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.

* Received 21 September 2020.

6. STO 34.01-39.3-003–2018. *Reglament upravleniya kachestvom elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh dochernikh zavisimyykh obshchestv PAO "Rosseti"* [Standard organization 34.01-39.3-003–2018. Regulations for managing the quality of electrical energy in the distribution grids of subsidiaries of PJSC Rosseti]. Moscow, Rosseti Publ., 2018.

7. Gritsay A., Makarov V., Khamitov R., Tatevosyan A., Gritsay S. The method of short-term forecast electricity load with combined a sinusoidal function and an artificial neural network. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg, Moscow, 2019, pp. 523–526. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656796.

8. Tyunkov D.A., Gritsay A.S., Potapov V.I., Khamitov R.N., Blohin A.V., Kondratukova L.K. Short-term forecast methods of electricity generation by solar power plants and its classification. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1260, iss. 5, p. 052033.

9. Yang Z., Chai Y. A survey of fault diagnosis for onshore grid-connected converter in wind energy conversion systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 66, pp. 345–359.

10. Zhang F., Mu L. A fault detection method of microgrids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the pq control strategy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, vol. 10 (5), pp. 4816–4826.

11. Bui D.M., Lien K.-Y., Chen S.-L., Lu Y.-C., Chan C.-M., Chang Y.-R. Investigate dynamic and transient characteristics of microgrid operation and develop a fast-scalable-adaptable algorithm for fault protection system. *Electric Power Systems Research*, 2015, vol. 120, pp. 214–233.

12. Bhandari B., Poudel S.R., Lee K.-T., Ahn S.-H. Mathematical modeling of hybrid renewable energy system: A review on small hydro-solar-wind power generation. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 157–173.

13. Sahoo S.C., Panda B., Dash R., Panda B., Kar S. Modeling of solar wind hybrid renewable energy sources in Simulink. *Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems, ICSCS 2015*. New Delhi, Springer, 2016, vol. 1, pp. 939–947.

14. Zubakin V.A., Karnaukhov M.N., Starinnov S.A. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya solnechnyykh i vetrovykh elektrostantsii* [Design, construction and operation of solar and wind power plants]. Moscow, RSU of Oil and Gas Publ., 2019. 163 p.

15. Moussavi S.Z., Atapour R. Dynamic modelling and control of doubly fed induction generator variable speed wind turbine. *Computational Intelligence and Information Technology, CIIT 2011*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2011, pp. 78–86.

16. Suresh A., Resmi R., Vanitha V. Mathematical model of brushless doubly fed induction generator based wind electric generator. *Power Electronics and Renewable Energy Systems*. India, Springer, 2015, pp. 1477–1487.

17. Kumar A., Munda J., Singh G. Wind-driven stand-alone six-phase self-excited induction generator transients under different loading conditions. *Electrical Engineering*, 2015, vol. 97, pp. 87–100.

18. Al-Hamadani H., An T., King M., Long H. System dynamic modelling of three different wind turbine gearbox designs under transient loading conditions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 1659–1668.

19. Chettibi N., Mellit A. Study on control of hybrid photovoltaic-wind power system using Xilinx system generator. *Solar Photovoltaic Power Plants*. Singapore, Springer, 2019, pp. 97–120.

20. Muthukumar R., Balamurugan P. A model predictive controller for improvement in power quality from a hybrid renewable energy system. *Soft Computing*, 2019, vol. 23 (8), pp. 2627–2635.

21. Song H., De T. Research on maximum wind energy capturing of doubly fed induction wind generator based on fuzzy control technology. *Future Communication, Computing, Control and Management*, 2012, vol. 141, pp. 43–48.

22. Khan M.J., Mathew L. Fuzzy logic controller-based MPPT for hybrid photo-voltaic/wind/fuel cell power system. *Neural Computing and Applications*, 2019, vol. 31, no. 10, pp. 6331–6344.

Для цитирования:

О разработке программно-аппаратного комплекса моделирования электросетевого контроллера и объектов микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии в сетях НН 0,4 кВ / А.С. Грицай, Е.В. Чебаненко, В.И. Потапов, Е.Г. Андреева, Р.Н. Хамитов, И.В. Червенчук // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 61–72. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-61-72.

For citation:

Gritsay A.S., Chebanenko E.V., Potapov V.I., Andreeva E.G., Khamitov R.N., Chervenчук B.V. O razrabotke programmno-apparatnogo kompleksa modelirovaniya elektrosetevogo kontrollera i ob"ektov mikrogeneratsii na osnove vozobnovlyaemykh istochnikov energii v setyakh NN 0,4 kV [On the development of a software and hardware complex for modeling a power grid controller and microgeneration facilities based on renewable energy sources in LV 0,4 kV networks]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 61–72. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-61-72.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.415.2

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-73-84

Начальные этапы проектирования системы сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа^{*}

И.С. КАЛЫТЮК^а, Г.А. ФРАНЦУЗОВА^б, А.В. ГУНЬКО^с

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

^а ivankalytyuk@yandex.ru ^б frants@ac.cs.nstu.ru ^с gun@ait.cs.nstu.ru

В настоящей статье рассматривается проектирование системы сбора и предиктивного анализа социальных медиа. По мере развития сети Интернет, а также социальных медиа более простыми стали доступ и распространение информации, ведь сами пользователи сети являются одновременно создателями и получателями различной информации. Для получения новых знаний, которые могут быть полезны пользователям социальных медиа, возможно использование предиктивной (прогнозной) аналитики – комплекса методов статистического анализа, которые извлекают новую информацию из текущих и исторических данных. Такой метод анализа данных социальных медиа находится на стадии своего развития.

В основе предиктивной аналитики лежит автоматический поиск связей, аномалий и закономерностей между различными факторами. Для формирования прогнозной модели используется большой набор статистических методов моделирования, интеллектуальный анализ данных, машинное обучение, нейронные сети и другие механизмы. В совокупности с различными методами сбора информации с интернет-ресурсов, таких как парсинг и API социальных сетей, предиктивная аналитика может предлагать наиболее интересные для пользователя источники информации. Для того чтобы объединить методы предиктивного анализа и методы сбора данных, требуется внимательно отнестись к процессу проектирования системы.

В работе предложено формальное описание данных, которые использует будущая система. Помимо этого, выделены общая архитектура и алгоритм функционирования. Особое внимание обращено на подробное описание одной из основных частей системы (подсистемы сбора). Полученные результаты будут использоваться при дальнейшем проектировании, планируется рассмотрение подсистемы аналитики. Последующая работа над темой позволит детализировать архитектуру и алгоритм функционирования.

Ключевые слова: социальные медиа, предиктивный анализ, проектирование системы, архитектура, алгоритм функционирования, сбор данных, API, парсинг

^{*} Статья получена 24 августа 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, на сегодняшний день самым массовым и оперативным источником информации является Интернет, где существенное значение имеют социальные медиа, влияние которых на жизнь современного человека всё возрастает [1]. Основная разновидность социальных медиа – социальные сети. Из наиболее известных можно выделить следующие: Facebook, VK, Instagram, YouTube, Twitter, «Одноклассники», а также мессенджеры WhatsApp, Telegram. Важнейшие функции социальных сетей – влияние на восприятие, отношение и конечное поведение потребителей. Поскольку социальные сети – это огромная база данных, где представлена различная информация о миллионах людей, то это привлекает специалистов из самых разных областей.

В связи с этим важное значение приобретает анализ размещенной в социальных сетях информации и возможность прогнозирования будущих событий. Однако методы предиктивного анализа этих сетей находятся еще на стадии развития [2]. Отсюда очевидна актуальность внедрения таких методов для анализа данных социальных медиа, а также оценка применимости методов предиктивной аналитики.

Целью настоящей работы является проектирование системы сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа на основе различных методов сбора данных из социальных сетей [3].

Основной проблемой при проектировании такой системы является разработка ее общей архитектуры и алгоритма функционирования. Следует достаточно четко понимать, какие подсистемы и модули должны быть в составе системы, иначе в будущем при разработке может возникнуть необходимость добавления или удаления некоторых частей.

Структура работы следующая: в первом и втором разделах представлена постановка задачи и формальное описание данных, которые будут использоваться в системе. Общий алгоритм функционирования и архитектура системы описаны в третьем разделе, а проектирование подсистемы сбора и связанных с ней модулей представлено в четвертом разделе.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо разработать эффективную систему сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа. Целью функционирования системы является представление пользователю интернет-источников, которые могут быть ему интересны в будущем по настоящим данным.

К системе предъявляются следующие требования.

- Четкое описание входных данных.
- Необходимость структуризации собранных данных.
- Ограничение количества собранных данных для получения приемлемых результатов.
- Преобразование данных к виду, пригодному для анализа.
- Определение количества результатов.
- Четкое описание выходных данных.

Для достижения поставленной цели с учетом предъявляемых требований общую задачу разделим на ряд подзадач:

- 1) определение входных данных и структуризация;
- 2) определение ресурсов собранных данных;
- 3) определение выходных данных.

В свою очередь, каждой из подзадач соответствуют свои требования из общего перечня. Для определения входных данных и их структуризации необходимо иметь четкое описание входных данных; для решения второй подзадачи следует ограничить количество собранных данных с целью получения приемлемых результатов и преобразовать эти данные к виду, пригодному для анализа. Решение третьей подзадачи предполагает определение количества результатов и четкое описание выходных данных.

Схематично общая система предиктивного анализа с выделенными подзадачами представлена на рис. 1.

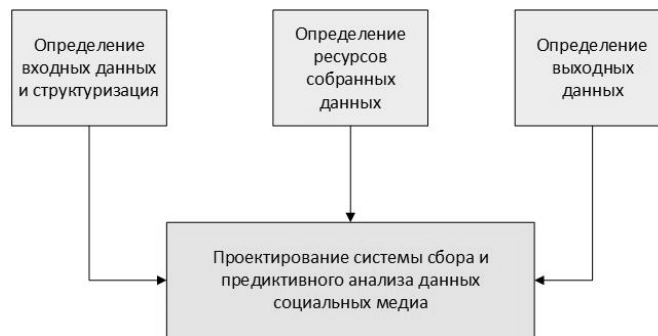


Рис. 1. Схематичное представление постановки задачи

Fig. 1. Schematic representation of the problem statement

Далее рассмотрим решение каждой из подзадач.

2. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧ И ФОРМАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

Отметим, что входными данными для системы являются данные из первой подзадачи, которые формально можно описать следующим образом:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}, \quad (1)$$

где x_i – одно ключевое слово, которое будет использоваться для сбора данных; $i \in [1, n]$, n – количество ключевых слов. Входные данные могут быть единичными (поиск по одному ключевому слову, упоминанию пользователя) – в этом случае $X = x_1$. В случае массива учитывается только совместное появление в каком-либо месте интернет-ресурса.

Необходимо понимать, что сами по себе отдельные данные, которые будут собраны, не являются достаточными для дальнейшей работы. Для того чтобы использовать эту информацию, ее необходимо преобразовать в структурированный вид [4]. Можно привести различные методы для сбора данных социальных сетей, а именно методы получения данных через API и через

парсинг различных интернет-ресурсов. Существуют программные комплексы, использующие данные методы, которые помимо сбора данных сразу работают над их структуризацией [3].

Вторая подзадача предполагает определение тех ресурсов, на которых встречаются введенные пользователем ключевые слова. Так как после сбора данных будет производиться предиктивный анализ, имеет смысл выбирать только последние (по дате) ресурсы из сети Интернет. Предлагается до начала анализа ограничить количество ресурсов числом 3000.

Предполагается, что имеет место комбинированное использование разработки правил парсинга и изучения каждого из API социальных сетей. Возможны общие правила парсинга, однако всегда нужно анализировать попадающие системе ресурсы из сети Интернет и выбирать, в каком случае можно использовать запросы к API, а в каком – парсинг [5].

Представление промежуточных данных с учетом (1) имеет вид

$$X^* = \left\{ \begin{array}{l} A_1(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n); \\ A_2(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n); \\ \dots \\ A_j(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n); \\ \dots \\ A_m(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где A_j – ресурс, на котором упоминаются одновременно все ключевые слова; $j \in [1, m]$, m – количество полученных ресурсов (ограничено 3000).

Как видно, входные данные для анализа можно представить в виде вектора, включающего в себя интернет-ресурсы. После определения всех ресурсов, по которым был произведен сбор, исходные входные данные отбрасываются и оставляется только список полученных ресурсов. В результате (2) можно записать в виде вектора-столбца:

$$A^* = (A_1 A_2 \dots A_j \dots A_m)^T. \quad (3)$$

Выходные данные системы – это данные третьей подзадачи, которые представляют собой вектор:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n\}, \quad (4)$$

где y_i – один результат анализа (новые знания, полученные в результате функционирования системы); $i \in [1, n]$, n – количество желаемых результатов. Предполагается, что количество желаемых результатов задает пользователь системы.

Поскольку результатом анализа системы должны быть ресурсы, на которых, возможно, в будущем появится интересная пользователю информация, то запись (4) по аналогии с (3) преобразуется к виду

$$Y^* = (A_1^* A_2^* \dots A_j^* \dots A_m^*)^T, \quad (5)$$

где A_j^* – один из ресурсов – результатов анализа по промежуточным данным вектора A^* (из него выбираются лишь некоторые, в зависимости от количества желаемых результатов, заданного пользователем); $j \in [1, m]$.

3. ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

При разработке архитектуры системы учтем, что основными ее модулями являются подсистемы сбора и анализа данных, схематично представленные на рис. 2.

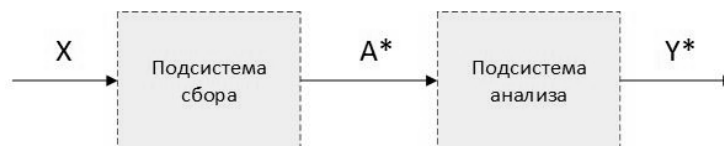


Рис. 2. Общая схема системы

Fig. 2. General schematic of the system

В системе кроме основных подсистем должно быть клиент-серверное приложение, которое осуществляет диалог пользователя и системы. Таким образом, интерфейс предполагает наличие следующих дополнительных модулей.

- Модуль ввода данных на сбор.
- Промежуточный модуль вывода результатов сбора.
- Промежуточный модуль ввода параметров анализа.
- Модуль вывода результатов анализа.

В результате расширенная схема системы принимает вид, показанный на рис. 3.

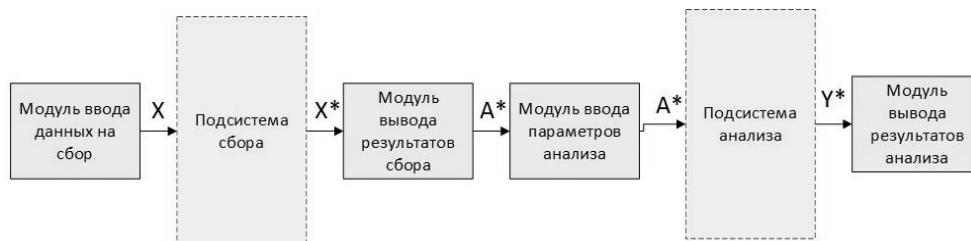


Рис. 3. Расширенная структура системы

Fig. 3. An extended structure of the system

Соответствующая предложенной структуре системы блок-схема алгоритма функционирования представлена на рис. 4.

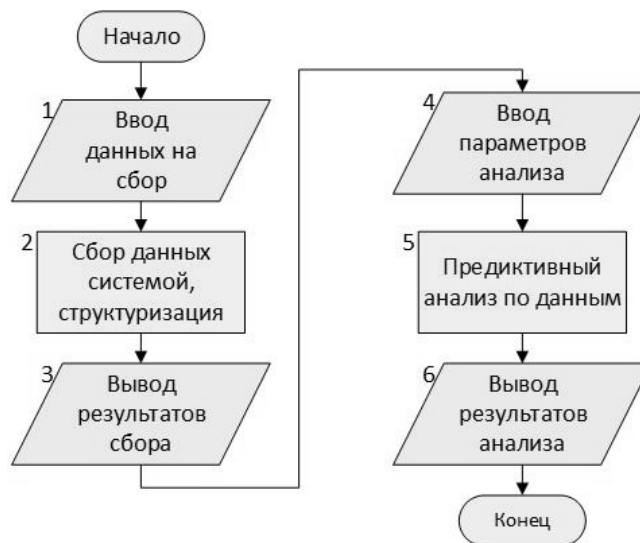


Рис. 4. Блок-схема общего алгоритма функционирования системы

Fig. 4. Block diagram of the general algorithm of the system functioning

Особенности функционирования системы иллюстрирует простой пример. Клиент (пользователь, исследователь) в интерфейсе системы выбирает некоторые конкретные данные, по которым будет производиться сбор данных и анализ. На основе этого система определяет ресурсы, с которых будут получены данные. После структуризации и прогнозирования пользователю предлагается несколько интересных для него вариантов. Например, если пользователь вводит данные по определенной фирме, то в результате будут выданы те группы (сообщества, каналы) в социальных медиа, где по результатам анализа предположительно могут быть новости и другая информация о данной фирме в будущем.

4. ПОДСИСТЕМА СБОРА И СВЯЗАННЫЕ С НЕЙ МОДУЛИ

Наиболее подходящими для сбора данных социальных медиа являются возможности программ, использующих API сайтов и парсинг. Потребуется комбинированное применение данных методов. Так как у многих сайтов API преимущественно свой [6], возможно следующее решение: под основные задачи, характерные для известных социальных медиа (поиск пользователей и их упоминаний / комментариев, тегов – ключевых слов), использовать API. В случае глобальных задач, таких как получение информационных статей, следует использовать парсинг.

Чаще всего архитектуры подсистем сбора описываются примерно одинаковым образом, как в [7]. Пользуясь этим, выделим следующие элементы для нашей подсистемы.

- Модуль планирования, который вносит в систему новые задачи на сбор.
- Очередь задач, определяющая порядок сбора данных.

- Программное обеспечение, сканирующее страницы сети Интернет для дальнейшего сохранения этих данных в базе данных и преобразовывающее информацию в структурированный вид.

- Модуль записи, который записывает структурированные данные на сервер (подсистема хранения).

Сначала пользователь вносит определенную информацию в систему, этим занимается модуль ввода данных на сбор. Входные данные переносятся в модуль планирования задач. Для всех основных ресурсов, по которым будет проводиться сбор, заранее формируются запросы. В данном модуле задачи никак не разбиваются по их сложности и времени выполнения, они создают список в зависимости от данных, введенных пользователем.

В ходе обработки создается порядок выполнения задач, он записывается в модуль очереди. В общем случае задача сводится к получению данных через API или парсинг по одному из интернет-ресурсов. Задачи могут выполняться параллельно, скорость обработки зависит от возможностей оборудования [8]. Порядок выполнения может быть сформирован по охвату социальной сети (количеству активных пользователей на данный момент). Обычно результат заранее не известен из-за постоянного обновления информации в Интернете [9], поэтому данный способ будет являться наилучшим для поставленной задачи.

Сбор информации включает в себя следующие этапы.

- Консолидация (извлечение данных).
- Трансформация (преобразование к структурированному виду).
- Очистка (удаление информации, которая может быть отброшена) [10].

Этапы консолидации и трансформации для сбора данных через API можно объединить. Этот метод чаще всего представляет информацию в структурированном виде [11]. Парсинг позволяет дополнить уже полученную информацию, используя не только социальные сети, но и обычные интернет-ресурсы.

Рассмотрим процесс консолидации. Сначала выбираются ресурсы, заданные в системе, как классические социальные медиа. К ним уже сформированы определенные стандартные запросы на поиск и сбор данных. Эти запросы относятся к API сайта. Такой метод разделения ресурсов позволяет облегчить задачу. Чаще всего на обычных новостных ресурсах более простым является использование стандартных алгоритмов парсинга, что нельзя сказать о социальных сетях, имеющих API.

В случае парсинга могут использоваться стандартные алгоритмы (например, библиотеки Python requests и BS4). Для создания правил парсинга данных в формате html и xml их может быть достаточно, но в случае формирования посредством JavaScript может понадобиться использование Selenium Web Driver, набора драйверов для работы с браузерами [12].

Также следует помнить об ограничениях, которые могут быть заложены создателями / администраторами интернет-ресурса:

- требование авторизации на сайте;
- блокировка большого количества запросов [13].

В первом случае решение может быть простым: предварительная авторизация с использованием POST-запросов. Однако регистрация на каждом из многочисленных ресурсов невозможна.

Во втором случае есть три известных метода решения:

- 1) установка времени между запросами;
- 2) имитация работы браузера при каждом запросе – эта возможность есть в вышеупомянутом Selenium Web Driver;

- 3) использование прокси.

Трансформация будет проводиться следующим образом:

- 1) выделение ресурсов, с которых получена информация;
- 2) для каждой социальной сети – получение списка источников: групп (каналов, сообществ) и пользователей, на чьих страницах расположены необходимые данные;

- 3) для каждого прочего интернет-ресурса – получение сайтов, в статьях / новостях которых расположена информация.

Очистка данных является третьим этапом сбора информации. Для данного этапа необходимо проводить проверку, является пользователь ботом или удален ли он. Это упрощает процесс анализа для подсистемы аналитики. В случае ботов основные социальные сети блокируют их в течение небольшого количества времени, что переносит их в разряд удаленных [14]. Ботов определить просто: это пользователи, зарегистрированные совсем недавно, состоящие в большом количестве сообществ. Учитывая это, данная проверка выглядит следующим образом: если пользователь зарегистрирован в течение предыдущих 24 часов и состоит более чем в 100 публичных страницах (группы, например, в социальной сети «ВКонтакте» можно скрыть), то пользователь вносится в список ботов и полученная информация отбрасывается без сохранения в базе данных системы.

Некоторые данные в социальных сетях пользователи делают скрытыми. Однако общая информация, такая как количество подписчиков (в Twitter, Instagram, YouTube и других) позволяет проводить очистку данных на их основе. В социальной сети «ВКонтакте» стоит ориентироваться именно на публичные страницы, хотя не все боты скрывают и группы.

Итоговый результат по каждой из задач необходимо сохранить, этим занимается модуль записи. При этом используется система управления базами данных. В дальнейшем подсистема предиктивного анализа обращается именно уже к записям базы данных.

Каждый запрос пользователя представляет собой отдельную обработку и анализ данных, приводящие к различным результатам. Чтобы не допустить излишней загрузки баз данных системы, предлагается очистка устаревших запросов (более месяца) с результатами. Пользователь может выгрузить уже имеющиеся результаты в одном из доступных форматов либо сохранить запрос. Следует учесть, что с течением времени данные становятся устаревшими. В любом случае это ведет к редактированию входных данных и полученных результатов для последующей аналитики [15].

По итогам работы подсистема сбора передает полученные результаты в модуль вывода результатов сбора. Он представляет результаты в удобном для пользователя виде. Далее данные можно сгруппировать для анализа по отдельным ресурсам, либо же аналитика проводится по всей полученной информации. Также можно указать желаемое количество результатов.

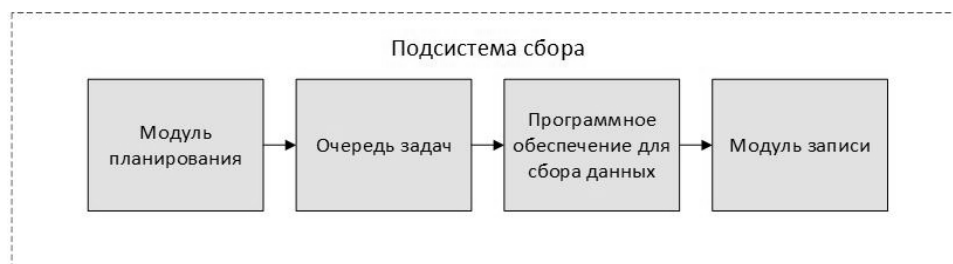


Рис. 5. Подсистема сбора

Fig. 5. Collection subsystem

Все действия в подсистеме сбора выполняются последовательно. В связи с этим можно предложить общий вид подсистемы сбора, показанный на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предъявляемые к системе требования распределены по подзадачам, совокупное решение которых позволит спроектировать эффективную систему сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа. Предложено формальное описание входных, промежуточных и выходных данных системы, описаны особенности их представления и получения от пользователя. Представлена общая архитектура системы и алгоритм ее функционирования.

Подробно описаны элементы и процессы подсистемы сбора данных, рассматривается ее взаимодействие с пользователем. Предложены методы трансформации и очистки данных при сборе, а также возможные варианты обхода ограничений при парсинге данных и оптимизации хранения информации.

В дальнейшем планируется рассмотреть проектирование подсистемы анализа данных социальных медиа, которая является второй основной составляющей общей системы. Это позволит представить архитектуру системы и алгоритм функционирования в более детальном виде, что даст возможность окончательной разработки системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калытюк И.С. Разработка и исследование алгоритма извлечения данных геолокации в социальных сетях // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки. – 2018. – № 11 (70). – С. 39–44.
2. Калытюк И.С., Французова Г.А., Гунько А.В. К вопросу выбора методов предиктивного анализа данных социальных медиа // Автоматика и программная инженерия. – 2019. – № 4 (30). – С. 9–17.
3. Суханов А.А., Маратканов А.С. Анализ способов сбора социальных данных из сети Интернет // International Scientific Review. – 2017. – № 1 (32). – С. 22–25.
4. Social media analytics – challenges in topic discovery, data collection, and data preparation / S. Stieglitz, M. Mirbabaie, B. Ross, C. Neuberger // International Journal of Information Management. – 2018. – Vol. 39. – P. 156–168.
5. Низомутдинов Б.А., Тропников А.С., Углова А.Б. Автоматизированный сбор данных социальных сетей для разработки факторной модели сетевой самопрезентации // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 64–71.

6. *Russell M.A.* Mining the social Web. Data mining Facebook, Twitter, LinkedIn, Google+, GitHub, and more. – O'Reilly Media, 2013. – 448 p.

7. *Чесноков В.О.* Программное обеспечение сбора и анализа графов ближайшего окружения из онлайн-социальных сетей // *Машиностроение и компьютерные технологии.* – 2018. – № 8. – С. 34–44.

8. *Мельник Э.В., Клименко А.Б.* Применение концепции «туманных» вычислений при проектировании высоконадежных информационно-управляющих систем // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* – 2020. – № 2. – С. 273–283.

9. *Райнова О.Д.* Решение задачи достижения наилучшего гарантированного результата поиска // *Открытое образование.* – 2006. – № 1. – С. 40–49.

10. *Гранаткин Д.С., Галиаскаров Э.Г.* Автоматизация сбора информации из открытых интернет-источников // *Объектные системы.* – 2016. – № 13. – С. 71–77.

11. *Турков Е.С., Степанов Ю.А.* Концептуальная модель модуля сбора данных о вакансиях для экспертной системы // *Международный научно-исследовательский журнал.* – 2020. – № 2-1 (92). – С. 75–78.

12. *Gojare S., Joshi R., Gaigaware D.* Analysis and design of selenium web driver automation testing framework // *Procedia Computer Science.* – 2015. – N 50. – P. 341–346.

13. *Thomas D.M., Mathur S.* Data analysis by web scraping using Python // 2019 3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). – Coimbatore, India, 2019. – P. 450–454.

14. Система идентификации информационных угроз на основе открытых данных сети Интернет / Д.О. Маркин, С.М. Макеев, Н.В. Изотов, А.Ю. Андросов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* – 2020. – № 9. – С. 86–94.

15. Big Data: The management revolution / A. McAfee, E. Brynjolfsson, T. Davenport, D. Patil, D. Barton // *Harvard Business Review.* – 2012. – Vol. 90. – P. 66–67.

Калытюк Иван Сергеевич, аспирант кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка и исследование систем сбора и анализа данных. E-mail: ivankalytyuk@yandex.ru

Французова Галина Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез систем экстремального регулирования. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru

Гунько Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка автоматизированных систем сбора и обработки результатов. E-mail: gun@ait.cs.nstu.ru

Kalytyuk Ivan S., postgraduate student at the Department of Automation in Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is development and research of data collection and analysis systems. E-mail: ivankalytyuk@yandex.ru

Frantsuzova Galina A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation, NSTU. The main field of her scientific research is synthesis of systems of extreme regulation. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru

Gun'ko Andrei V., Candidate of Technical Sciences, associate professor at the Department of Automation NSTU. The main field of his scientific research is development of automated systems for collecting and processing results. E-mail: gun@ait.cs.nstu.ru

Initial stages of designing a system for collecting and predictive analysis of social media data

I.S. KALYTYUK^a, G.A. FRANTSUZOVA^b, A.V. GUN'KO^c

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

^a *ivankalytyuk@yandex.ru* ^b *frants@ac.cs.nstu.ru* ^c *gun@ait.cs.nstu.ru*

Abstract

This article discusses the design of a system for collecting and predictive analysis of social media. With the development of the Internet, as well as social media, it has become easier to access and distribute information because network users themselves are both creators and recipients of diverse information. To gain new knowledge that can be useful to users of social media, it is possible to use predictive analytics – a set of statistical analysis methods that extract new information from current and historical data. This method of analyzing social media data is at the stage of its development.

Predictive analytics is based on automatic search for connections, anomalies and patterns between various factors. To form a predictive model, a large set of statistical modeling methods, data mining, machine learning, neural networks and other mechanisms are used. Together with various methods of collecting information from Internet resources, such as parsing and social network APIs, predictive analytics can offer the most interesting sources of information for the user. In order to combine the methods of predictive analysis and data collection methods, it is necessary to take a detailed approach to the system design process.

The paper proposes a formal description of the data that a future system uses. In addition, the general architecture and algorithm of functioning are highlighted. Special attention is paid to a detailed description of one of the main parts of the system (the collection subsystem). The obtained results will be used in further design, and it is planned to further study the analytics subsystem. Subsequent work on this topic will make it possible to detail the architecture and algorithm of functioning.

Keywords: social media, predictive analysis, system design, architecture, algorithm of functioning, data collection, API, parsing

REFERENCES

1. Kalytyuk I.S. Razrabotka i issledovanie algoritma izvlecheniya dannykh geolokatsii v sotsial'nykh setyakh [Development and research of an algorithm for extracting geolocation data in social networks]. *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki = Scientific community of students of the XXI century. Technical Science*, 2018, no. 11 (70), pp. 39–44.
2. Kalytyuk I.S., Frantsuzova G.A., Gunko A.V. K voprosu vybora metodov prediktivnogo analiza dannykh sotsial'nykh media [On the choice of methods for predictive analysis of social media data]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya = Automatics and Software Engineering*, 2019, no. 4 (30), pp. 9–17.
3. Sukhanov A.A., Maratkanov A.S. Analiz sposobov sbora sotsial'nykh dannykh iz seti Internet [Analysis of ways to collect social data from the Internet]. *International Scientific Review*, 2017, no. 1 (32), pp. 22–25. (In Russian).
4. Stieglitz S., Mirbabaie M., Ross B., Neuberger C. Social media analytics - challenges in topic discovery, data collection, and data preparation. *International Journal of Information Management*, 2018, vol. 39, pp. 156–168.

* Received 24 August 2020.

5. Nizomutdinov B.A., Tropnikov A.S., Uglova A.B. Avtomatizirovannyi sbor dannykh sotsial'nykh setei dlya razrabotki faktornoj modeli setevoi samoprezentatsii [Automated data collection of social networks for the development of a factor model of network self-presentation]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 64–71. (In Russian).
6. Russell M.A. *Mining the social Web. Data mining Facebook, Twitter, LinkedIn, Google+, GitHub, and more*. O'Reilly Media, 2013. 448 p.
7. Chesnokov V.O. Programmnoe obespechenie sbora i analiza grafov blizhaishego okruzheniya iz onlainovykh sotsial'nykh setei [Software for collecting and analyzing immediate environment graphs from online social networks]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii = Mechanical engineering and computer technology*, 2018, no. 8, pp. 34–44. (In Russian).
8. Mel'nik E.V., Klimenko A.B. Primenenie kontseptsii "tumannykh" vychislenii pri proektirovani vysokonadezhnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem [Application of the concept of "foggy" computing in the design of highly reliable information and control systems]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2020, no. 2, pp. 273–283.
9. Rainova O.D. Reshenie zadachi dostizheniya nailuchshego garantirovannogo rezul'tata poiska [Solving the problem of achieving the best guaranteed search result]. *Otkrytoe obrazovanie = Open Education*, 2006, no. 1, pp. 40–49.
10. Granatkin D.S., Galiaskarov E.G. Avtomatizatsiya sbora informatsii iz otkrytykh internet-istochnikov [Automation of information collection from open Internet sources]. *Ob'ektnye sistemy = Object Systems*, 2016, no. 13, pp. 71–77.
11. Turkov E.S., Stepanov Yu.A. Kontseptual'naya model' modulya sbora dannykh o vakansiyakh dlya ekspertnoi sistemy [Conceptual model of the module for collecting data on vacancies for the expert system]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*, 2020, no. 2-1 (92), pp. 75–78. (In Russian).
12. Gojare S., Joshi R., Gaigaware D. Analysis and design of selenium web driver automation testing framework. *Procedia Computer Science*, 2015, no. 50, pp. 341–346.
13. Thomas D.M., Mathur S. Data analysis by web scraping using Python. *2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, India, 2019, pp. 450–454.
14. Markin D.O., Makeev S.M., Izotov N.V., Androsov A.Yu. Sistema identifikatsii informatsionnykh ugroz na osnove otkrytykh dannykh seti internet [Information threat identification system based on open Internet data]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2020, no. 9, pp. 86–94.
15. McAfee A., Brynjolfsson E., Davenport T., Patil D., Barton D. Big Data: The management revolution. *Harvard Business Review*, 2012, vol. 90, pp. 66–67.

Для цитирования:

Калытюк И.С., Французова Г.А., Гунько А.В. Начальные этапы проектирования системы сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 73–84. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-73-84.

For citation:

Kalytyuk I.S., Frantsuzova G.A., Gunko A.V. Nachal'nye etapy proektirovaniya sistemy sbora i prediktivnogo analiza dannykh sotsial'nykh media [Initial stages of designing a system for collecting and predictive analysis of social media data]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 73–84. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-73-84.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.52

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-85-102

Дихотомия. Дихотомия? Дихотомия! Модифицированный метод дихотомии решения нелинейных скалярных уравнений и некоторые результаты его исследований*

А.В. МАЙСТРЕНКО^а, К.А. МАЙСТРЕНКО^б, А.А. СВЕТЛАКОВ^с

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

^а maestro67@mail.ru ^б gos1kk@mail.ru ^с svetlakov38@mail.ru

Продолжение статьи Майстренко А.В., Майстренко К.А., Светлакова А.А. «Дихотомия. Дихотомия? Дихотомия! Основные положения, проблемы терминологии и инспекционный анализ метода дихотомии», опубликованной в Научном вестнике НГТУ № 4 (80), в которой был предложен модифицированный вариант метода дихотомии, обладающий всеми основными достоинствами модифицируемого метода. Данный метод обладает рядом достоинств по сравнению с другими методами решения нелинейных уравнений, однако в настоящее время он не нашел широкого практического использования. Основной причиной его малой популярности является низкая скорость сходимости последовательности приближенных решений и большие объемы вычислений, необходимые для получения достаточно точных решений. Цель исследования: предложить модифицированный вариант метода дихотомии, позволяющий получать более быстросходящиеся последовательности приближенных решений нелинейных скалярных уравнений и требующий существенно меньших объемов вычислений, необходимых для получения решений с желаемой точностью посредством решения ряда конкретных нелинейных уравнений проиллюстрировать более высокую скорость сходимости последовательности приближенных решений, вычисляемых с применением модифицированного метода дихотомии, и тем самым обосновать преимущество нового метода для его использования при создании различных систем автоматического управления и регулирования. Предложена модификация метода деления отрезка пополам, обладающая всеми основными достоинствами модифицируемого метода. Приведены результаты решения четырех нелинейных уравнений, иллюстрирующие более высокую скорость сходимости решений, вычисляемых с применением предложенной модификации. Результаты исследований могут быть использованы при разработке современных автоматических систем управления различными технологическими процессами и объектами.

Ключевые слова: дихотомия, робастность, модификация, выпуклая комбинация точек, веса значений функции, регуляризация, автоматическое управление, производная

* *Статья получена 26 ноября 2020 г.*

1. АНАЛИЗ ПОТРЕБНОСТЕЙ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА ДИХОТОМИИ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ

Имеющееся в настоящее время обилие средств вычислительной техники и их высокое быстродействие коренным образом изменили критерии и подходы к оценке эффективности численных методов решения нелинейных уравнений и их пригодности для использования в тех или иных конкретных условиях. В частности, быстродействие данных методов и скорость сходимости вычисляемых с их применением решений u_k уравнения (1.6) [1] к его точному решению u^* оказываются практически уже не столь существенными, значимыми и определяющими, как это было ранее, и наоборот: актуальной оказывается задача повышения робастности метода или, что то же самое, увеличения устойчивости метода к ошибкам задания исходных данных и ошибкам счета, неизбежно возникающим при проведении любых расчетов с применением любого цифрового вычислительного устройства. Особенно актуальной потребность в робастных методах и алгоритмах решения нелинейных уравнений оказывается в разработках различного рода автоматических и автоматизированных систем управления процессами, контроля данных процессов и их диагностики, функционирующих в реальном масштабе времени [2–11]. Ее чрезвычайная актуальность в подобных ситуациях обуславливается неизбежным наличием ошибок задания (зашумленностью) исходных данных решаемых уравнений, а также предельно высокими и жесткими требованиями к точности вычисляемых решений и недопустимо большими потерями, которые могут возникнуть в результате использования недостаточно точных решений данных уравнений.

Остановимся теперь на возможностях модифицирования метода деления отрезка пополам с целью получения такой его модификации, т. е. результата его модифицирования, которая бы обладала всеми отмеченными в [1] семью достоинствами модифицируемого метода дихотомии и в то же время имела более высокую по сравнению с ним скорость сходимости.

Такие возможности нетрудно обнаружить, если воспользоваться хорошо известным в выпуклом анализе понятием выпуклой комбинации точек заданного отрезка прямой и применить его к точкам отрезка I_{uk} , полученного на k -й итерации применения метода дихотомии и соответственно описываемого соотношением вида

$$I_{uk} = [a_k, b_k]. \quad (1.1)$$

Здесь, как и всюду выше, a_k и b_k – нижняя и верхняя границы отрезка I_{uk} , который, очевидно, содержит в себе истинное решение u^* уравнения (1.6) [1] и соответственно, как вытекает из определения выпуклой комбинации двух точек любого отрезка, его можно рассматривать как некоторую выпуклую комбинацию границ a_k и b_k и в соответствии с определением данной комбинации представить его равенством вида

$$u^* = v_{k1}a_k + v_{k2}b_k, \quad (1.2)$$

в котором коэффициенты v_{k1} и v_{k2} удовлетворяют следующим двум условиям:

$$a) v_{ki} \geq 0, i = \overline{1,2} \quad \text{и} \quad б) v_{k1} + v_{k2} = 1,0, \quad (1.3)$$

т. е. являются неотрицательными числами, причем такими, что их сумма равна единице.

Замечание. Как известно, в теории вероятностей и в математической статистике, а также в теории фильтрации сигналов и оценивания неизвестных величин и в других областях науки и техники такие коэффициенты принято называть весами стоящих за ними величин. Поводом для употребления данного термина является то, что они позволяют «взвесить», т. е. количественно оценить значимость и полезность стоящих за ними множителей (в нашем случае границ a_k и b_k отрезка I_{uk}), придавая при этом большие веса тем из данных множителей, значимость и полезность которых для решения задачи оказываются наиболее существенными.

Воспользовавшись условием (1.3б), равенство (1.2) можно заменить следующим эквивалентным ему равенством:

$$u^* = v_k a_k + (1 - v_k) b_k. \quad (1.4)$$

Здесь v_k и $(1 - v_k)$ – коэффициенты данной комбинации. При этом коэффициент v_k удовлетворяет следующим строгим неравенствам:

$$0 < v_k < 1. \quad (1.5)$$

Непосредственными вычислениями нетрудно убедиться в том, что этим же неравенствам удовлетворяет и коэффициент $(1 - v_k)$, а сумма данных коэффициентов равна 1,0.

Отмеченные факты позволяют заключить, что наряду с оценками a_k и b_k решения u^* применение метода дихотомии позволяет получать еще сколько угодно много других точечных оценок данного решения, сходящихся к его истинному значению u^* при $k \rightarrow \infty$, и для получения любой из таких оценок необходимо и достаточно задавать какие-либо численные значения коэффициента v_k , $k = 1, 2, 3, \dots$. В частности, полагая при каждом k коэффициент $v_k = 0.5$, мы получим последовательность оценок \bar{u}_k решения u^* , вычисляемых в соответствии с равенствами (2.3) [1], которая, очевидно, при $k \rightarrow \infty$ будет сходиться к решению u^* уравнения (1.6) [1].

Вполне очевидно, что при использовании любого другого из способов выбора коэффициента v_k в (1.2), удовлетворяющего неравенствам (1.5), мы получим некоторую последовательность оценок u_k , которая при $k \rightarrow \infty$ будет также сходиться к решению u^* . Замечательным и весьма важным с точки

зрения практических приложений обстоятельством в данном случае является то, что при использовании любого способа выбора значений коэффициента v_k в (1.2) оказывается возможным оценивать абсолютную погрешность Δ_{uk} решения u^* с применением u_k и делать это на каждой k -й итерации, $k = 1, 2, 3, \dots$. Как видно из (1.2) и (1.3), эта погрешность удовлетворяет неравенству

$$\Delta_{uk} \leq |b_k - a_k|, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1.6)$$

Совершенно ясно, что такая оценка погрешности является чрезмерно осторожной и пессимистичной. В самом деле, как вытекает из соотношений (1.4) и (1.5), при любом значении v_k , удовлетворяющем неравенствам (1.3а), приближенное решение u_k будет лежать внутри отрезка I_{uk} , и, таким образом, погрешность Δ_{uk} будет строго меньше $|b_k - a_k|$.

2. ИДЕЙНЫЕ ОСНОВЫ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СХЕМА МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА ДЕЛЕНИЯ ОТРЕЗКА ПОПОЛАМ

Для упрощения и сокращения последующего изложения вместо развернутого названия «метод деления отрезка пополам» всюду далее будем использовать его аббревиатуру МДОП и прежде всего отметим, что, как видно из соотношений (2.5), (2.6) и (2.7), (2.8) [1], при вычислении границ a_k и b_k отрезка I_{uk} в соответствии с данным методом фактически используется только знак значения y_k , а его модуль $|y_k|$ при этом никак не учитывается и не используется. Вместе с тем, учитывая монотонность функции $y = \varphi(u)$ на отрезке I_u и цель решения уравнения (1.6) [1] – найти такое значение аргумента u , при котором оно выполняется, очевидно, что при решении данного уравнения могут быть полезными не только знак функции $y = \varphi(u)$ в той или иной точке отрезка I_u , но и ее численное значение в данной точке. Действительно, поскольку функция $y = \varphi(u)$ является монотонной, то ее значение позволяет судить о близости или удаленности приближенного решения u_k от истинного решения u^* уравнения (1.6) [1] в соответствии с правилом: чем ближе модуль $|y_k|$ к нулю, тем ближе решение u_k к u^* , и наоборот: чем больше значение модуля $|y_k|$, тем дальше решение u_k от корня u^* .

Отмеченная связь между модулями $|y|$ и $|u - u^*|$ открывает возможность и стимулирует желание попытаться модифицировать МДОП таким образом, чтобы увеличить его скорость сходимости, не усложняя при этом заметным образом его вычислительную схему и не увеличивая трудоемкость его реализации. В этом состоит **первая идея**, положенная в основу излагаемого ниже модифицированного метода деления отрезка пополам. Как и в

случае МДОП и по тем же самым причинам всюду далее будем использовать аббревиатуру приведенного названия и будем называть данный метод ММДОП – модифицированный метод деления отрезка пополам.

Вторая идея, лежащая в основе ММДОП, заключается в использовании при выборе k -го приближенного решения u_k уравнения (1.6) [1] весов v_a и v_b значений $y_a = \varphi(a_{k-1})$ и $y_b = \varphi(b_{k-1})$, назначаемых или вычисляемых наиболее простыми способами.

Рассмотрим теперь вычислительную схему предлагаемого ММДОП более детально и сделаем это применительно к k -й итерации его применения, т. е. будем далее считать, что

1) мы уже выполнили $k-1$ итераций и получили интервал $I_{u,k-1} = [a_{k-1}, b_{k-1}]$;

2) при этом значения $y = \varphi(a_{k-1})$ и $y = \varphi(b_{k-1})$, как и при рассмотрении МДОП (см. рис. 2.2), удовлетворяют следующим неравенствам:

$$a) \varphi(a_{k-1}) < 0 \quad \text{и} \quad б) \varphi(b_{k-1}) > 0. \quad (2.1)$$

Для вычисления k -го приближенного решения u_k воспользуемся следующим равенством:

$$u_k = v_{a,k-1} \varphi(a_{k-1}) + v_{b,k-1} \varphi(b_{k-1}), \quad (2.2)$$

где $v_{a,k-1}$ и $v_{b,k-1}$ – веса значений $\varphi(a_{k-1})$ и $\varphi(b_{k-1})$, удовлетворяющие условиям

$$a) v_{a,k-1} > 0; v_{b,k-1} > 0 \quad \text{и} \quad б) v_{a,k-1} + v_{b,k-1} = 1, 0. \quad (2.3)$$

Непосредственной проверкой нетрудно убедиться в том, что данные условия не определяют веса $v_{a,k-1}$ и $v_{b,k-1}$ однозначно, и, таким образом, можно подобрать сколь угодно много пар $v_{a,k-1}$ и $v_{b,k-1}$, каждая из которых будет удовлетворять данным условиям. Отсюда вытекает, что для устранения данной недоопределенности веса v_a и v_b необходимо подчинить еще каким-либо дополнительным условиям, которые бы, во-первых, позволяли сузить несчетное множество их возможных значений и, во-вторых, которые бы позволяли «взвешивать» значения $\varphi(a_{k-1})$ и $\varphi(b_{k-1})$ с учетом их значимости, т. е. ценности и полезности с точки зрения решения уравнения (1.6) и трудоемкости вычисления его приближенного решения u_k .

Учитывая отмеченные выше соображения, очевидно, что веса v_a и v_b наиболее целесообразно выбирать таким образом, чтобы их значения были тем больше, чем меньше значение функции $y = \varphi(u)$, и наоборот: чем больше значение данной функции, тем меньшее значение должен иметь его вес. Совершенно ясно, что удовлетворить данному правилу можно сколь угодно

многими способами. В частности, ему можно удовлетворить в полной мере, если значения весов $v_{a,k-1}$ и $v_{b,k-1}$ выбирать обратно пропорциональными значениям $|\varphi(a_{k-1})|^{-n}$ и $|\varphi(b_{k-1})|^{-n}$ и соответственно удовлетворяющими следующим равенствам:

$$а) v_{a,k-1} = c |\varphi(a_{k-1})|^{-n} \quad и \quad б) v_{b,k-1} = c |\varphi(b_{k-1})|^{-n}, \quad (2.4)$$

где c – некоторый положительный коэффициент, а n – некоторое натуральное число. В самом деле, задавая веса v_a и v_b в соответствии с данными равенствами, мы тем самым отдаем большее предпочтение тому из значений $\varphi(a_{k-1})$ и $\varphi(b_{k-1})$, модуль которого ближе к нулю, а соответствующее ему значение аргумента u , как вытекает из монотонности функции $y = \varphi(u)$, ближе к решению u^* уравнения (1.6) [1]. Такой выбор весов $v_{a,k-1}$ и $v_{b,k-1}$, очевидно, вполне соответствует цели решения уравнения (1.6) [1], отыскание такого значения аргумента u , при котором функция $y = \varphi(u)$ принимает нулевое значение.

Вполне очевидно, что отмеченные выше соображения являются справедливыми при любом коэффициенте c и любом показателе степени n в равенствах (2.4), и, таким образом, эти равенства не определяют веса $v_{a,k-1}$ и $v_{b,k-1}$ однозначно. Не менее ясно и то, что для устранения их недоопределенности необходимо прежде всего задать в них показатель степени n . Действительно, выбрав какое-либо конкретное значение n , мы тут же получаем возможность вполне однозначно определить и коэффициент c в данных равенствах. Для этого необходимо и достаточно подставить их правые части в равенство (2.3б) и разрешить полученное при этом уравнение относительно c . Выполнив отмеченные операции, в результате получим, что коэффициент c должен определяться в соответствии со следующим равенством:

$$c = 1.0 / [|\varphi(a_{k-1})|^{-n} + |\varphi(b_{k-1})|^{-n}]. \quad (2.5)$$

Таким образом, для окончательного выбора весов v_{ak} и v_{bk} необходимо подчинить их еще какому-либо требованию или условию, полезному с точки зрения решения уравнения (1.6) [1]. Одним из условий подобного рода, полезность которого совершенно очевидна и не вызывает каких-либо сомнений, является простота, а соответственно, и предельная экономичность вычисления весов $v_{a,k-1}$ и $v_{b,k-1}$. Ориентируясь на это условие, очевидно, что их следует вычислить в соответствии со следующими равенствами:

$$а) v_{a,k-1} = s^{-1} / [|\varphi(a_{k-1})| + r] \quad и \quad б) v_{b,k-1} = s^{-1} / [|\varphi(b_{k-1})| + r], \quad (2.6)$$

где величина s определяется равенством вида

$$s = [|\varphi(a_{k-1})| + r]^{-1} + [|\varphi(b_{k-1})| + r]^{-1}, \quad (2.7)$$

а r – параметр регуляризации алгоритма – достаточно малое положительное число, необходимость введения которого в алгоритм мы рассмотрим ниже.

Как непосредственно видно из (2.6) и (2.7), коэффициенты v_a и v_b являются строго положительными числами, а их сумма равна 1.0, и, таким образом, они действительно являются весами значений $\varphi(a_{k-1})$ и $\varphi(b_{k-1})$. Еще одним простейшим способом назначения весов $v_{a,k-1}$ и $v_{b,k-1}$ является способ их задания в соответствии с равенствами

$$a) \ v_{a,k-1} = s^{-1} / [\varphi(a_{k-1})^2 + r] \quad \text{и} \quad б) \ v_{b,k-1} = s^{-1} / [\varphi(b_{k-1})^2 + r], \quad (2.8)$$

где величина s вычисляется согласно равенству

$$s = [\varphi(a_{k-1})^2 + r]^{-1} + [\varphi(b_{k-1})^2 + r]^{-1}, \quad (2.9)$$

а r , как и в (2.4), – параметр регуляризации алгоритма, необходимость введения которого мы также рассмотрим ниже.

Как уже отмечено нами выше, решение u_k , вычисленное в соответствии с равенством (2.2) и с использованием при этом весов (2.4) или (2.6), будет удовлетворять соотношению $u_k \in I_{u,k-1}$, т. е. будет принадлежать отрезку $I_{u,k-1}$ или, что то же самое, будет лежать внутри данного отрезка и соответственно делить его на две части. Однако, в отличие от МДОП, деление отрезка $I_{u,k-1}$ в данном случае будет осуществляться на две неравные части. Для решения вопроса о том, следует или не следует вычислять следующее $(k+1)$ -е приближенное решение u_{k+1} , вычисляем значение y_k функции $\varphi(u)$ в точке $u = u_k$, т. е. при найденном приближенном решении согласно равенству

$$y_k = \varphi(u_k), \quad (2.10)$$

и проверяем неравенство вида

$$|y_k| \leq \Delta\varphi, \quad (2.11)$$

где $\Delta\varphi$ – некоторое, как уже отмечено нами в комментариях неравенства (3.7) [1], наперед заданное, достаточно малое положительное число, введенное с целью регуляризации обсуждаемого алгоритма (см. неравенство (3.7) и его комментарии).

Если данное неравенство выполняется, то процесс решения уравнения (1.6) [1] на этом заканчиваем и принимаем в качестве его корня решение u_k . В противном случае изменяем границы a_{k-1} и b_{k-1} отрезка $I_{u,k-1}$ в

соответствии с правилами, вполне аналогичными правилам (2.7) и (2.8) [1] и имеющими следующий вид:

$$a_k = \begin{cases} a_{k-1}, & \text{если } y_k > 0; \\ u_k, & \text{если } y_k < 0; \end{cases} \quad (2.12)$$

$$b_k = \begin{cases} u_k, & \text{если } y_k > 0; \\ b_{k-1}, & \text{если } y_k < 0. \end{cases} \quad (2.13)$$

Теперь, используя найденные границы a_k и b_k , формируем отрезок $I_{uk} = [a_k, b_k]$ и вычисляем его длину l_k согласно равенству

$$l_k = b_k - a_k, \quad (2.14)$$

а затем проверяем условие вида

$$l_k \leq \Delta_u, \quad (2.15)$$

где Δ_u – некоторое, как уже отмечено нами в комментариях неравенства (3.6) [1], наперед заданное положительное число, введенное с целью регуляризации рассматриваемого алгоритма (см. неравенство (3.6) [1] и его комментарий).

Если данное неравенство выполняется, то процесс решения уравнения (1.6) [1] на этом заканчиваем и принимаем в качестве его корня приближенное решение u_k . В противном случае вычисляем очередное $(k+1)$ -е приближенное решение u_{k+1} уравнения (1.6) [1] согласно равенству

$$u_{k+1} = v_{ak}\varphi(a_k) + v_{bk}\varphi(b_k), \quad (2.16)$$

веса v_{ak} и v_{bk} определяются равенствами вида (2.5)–(2.9).

В завершение описания предлагаемого ММДОП сделаем два замечания, касающиеся выбора параметра регуляризации r , фигурирующего в равенствах (2.6)–(2.9), и изменений данного алгоритма в случае, когда функция $y = \varphi(u)$ является не монотонно возрастающей, как мы считали до сих пор, а монотонно убывающей функцией.

Замечание 1. Как вытекает из (2.5), по мере приближения решений u_k , $k = 1, 2, 3, \dots$, к истинному решению u^* уравнения (1.6) [1] значения $\varphi(a_{k-1})$ и $\varphi(b_{k-1})$ монотонно уменьшаются и стремятся к нулю, и, таким образом, рано или поздно, но неизбежно может возникнуть ситуация, когда значение $\varphi(a_{k-1})$ или $\varphi(b_{k-1})$ окажется близким к машинному нулю, а его обращение – невыполнимой операцией. Именно для устранения такого рода ситуаций и вводится параметр r в соотношениях (2.6)–(2.9). Его численное значение, очевидно, должно выбираться таким, чтобы при сколь угодно малом значении $\varphi(a_{k-1})$ или $\varphi(b_{k-1})$ не возникла необходимость деления единицы

на нуль и прерывание по этой причине процесса решения уравнения (1.6) [1]. Учитывая отмеченное выше, можно видеть, что для гарантированного устранения подобного рода ситуаций параметр r следует выбирать на 2-3 порядка больше машинного нуля.

Замечание 2. Как и МДОП, предлагаемый ММДОП применим не только в рассмотренном выше случае монотонно возрастающей функции $y = \varphi(u)$, но и в случае, когда она является монотонно убывающей функцией. Как нетрудно убедиться непосредственной проверкой, для этого необходимо и достаточно вместо правил (2.2) и (2.3) использовать правила вида

$$a_k = \begin{cases} a_{k-1}, & \text{если } y_k < 0; \\ u_k, & \text{если } y_k > 0; \end{cases} \quad (2.17)$$

$$b_k = \begin{cases} u_k, & \text{если } y_k < 0; \\ b_{k-1}, & \text{если } y_k > 0. \end{cases} \quad (2.18)$$

Эти соотношения позволяют видеть, что и в этом случае имеющийся отрезок $I_{u,k-1}$ на k -й итерации делится на две неравные части и соответственно на каждой из них он сужается более чем в 2 раза.

3. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ МДОП И ММДОП

Как показано нами выше, предложенное изменение МДОП позволило получить модифицированный его вариант, позволяющий вычислять последовательности приближенных решений u_k уравнения (1.6) [1], сходящиеся к его истинному решению u^* с более высокой скоростью сходимости, чем последовательности аналогичных решений, вычисляемых с применением МДОП. Вполне очевидно, что данная оценка сравниваемых методов имеет существенно качественный характер и, соответственно, стимулирует желание получить какие-либо более тонкие количественные оценки скорости сходимости решений u_k , вычисляемых с применением сравниваемых методов. К получению такого рода оценок и анализу возможностей их получения мы еще вернемся. Здесь же рассмотрим изменения других свойств и особенностей МДОП, обусловленные предложенным его изменением. В предельно укрупненном виде эти изменения представлены в табл. 3.1.

Приведем некоторые комментарии представленных в табл. 3.1 результатов, оценим их значимость с точки зрения практических приложений и сделаем это в том же порядке, в котором они представлены в табл. 3.1.

1. Как видно из соотношений (2.1)–(2.9), введение в алгоритм равенств (2.6)–(2.9) не требует подчинения функции $y = \varphi(u)$ каким-либо дополнительным условиям, и, таким образом, область возможных применений ММДОП полностью совпадает с областью возможных применений МДОП. Другими словами, ММДОП применим во всех тех случаях, в которых можно использовать МДОП, и, следовательно, он является столь же универсальным, как и МДОП.

Таблица 3.1

Table 3.1

Изменение свойств и особенностей МДОП
Changes in the properties and features MDSH

№ п/п	Наименование характеристик МДОП, свойств и особенностей	Качественный характер изменения свойств МДОП
1	Универсальность	Не изменяется
2	Идейная и алгоритмическая простота	Усложняются, но несущественно
3	Доступность для программной и аппаратной реализаций	Уменьшается, но сохраняется
4	Устойчивость к ошибкам вычислений	Сохраняется в полной мере
5	Возможность интервального оценивания решения u^*	Сохраняется в полной мере
6	Возможность прогнозирования числа итераций	Сохраняется, но с меньшей точностью
7	Простота регуляризации	Сохраняется в полной мере

2. Замена в МДОП идеи деления отрезка I_{k-1} пополам идеей его деления тоже на две, но не равные части, а с учетом значений функции $y = \varphi(u)$ в его граничных точках a_{k-1} и b_{k-1} , и ее алгоритмическая реализация с помощью соотношений (2.6) и (2.7) или (2.8) и (2.9), очевидно, усложняют и идейные основы метода и их алгоритмическую реализацию. В этой связи возникает совершенно естественный и нериторический вопрос о том, насколько и в каких условиях рассматриваемая замена идей оказывается целесообразной и оправданной какими-либо дополнительными условиями или соображениями. Совершенно ясно, что одним из таких дополнительных условий является суммарный объем вычислений V_s , определяемый равенством вида

$$V_s = V_{it}n. \quad (3.1)$$

Здесь V_{it} – объем вычислений, выполняемых при реализации одной итерации уточнения приближенного решения уравнения (1.6) [1], а n – количество итераций, которое необходимо выполнить для того, чтобы получить такое решение данного уравнения, абсолютная погрешность Δ_u которого удовлетворяет соотношению

$$\Delta_u \leq \Delta u_0, \quad (3.2)$$

где Δu_0 – некоторое достаточно малое положительное число, выбираемое с учетом желаемой точности приближенного решения. Не менее ясно и то, что, используя соотношения (2.3)–(2.6) [1] и (2.6)–(2.18), можно с точностью до числа вычислительных и логических операций, необходимых для вычисления значений функции $y = \varphi(u)$, оценить величины V_{it} как для МДОП, так и для ММДОП. Более того, считая длительности выполнения каждой из этих операций известными, что, очевидно, вполне обоснованно, так как при желании их достаточно просто оценить, величины V_{it} можно представить как суммарную длительность времени T_{is} , необходимого для выполнения всей их совокупности при совершении одной итерации уточнения вычисленного на предшествующей итерации решения u_{k-1} . Использование величины T_{is} позволяет заменить равенство (2.14) равенством, имеющим вид

$$T_S = T_{is}n, \quad (3.3)$$

где T_S – суммарное время, которое потребуется для получения приближенного решения уравнения (1.6) [1], удовлетворяющего неравенству (2.15). Вполне очевидно, что использование величин T_{is} и T_S является более удобным и позволяет более корректно сравнить МДОП и ММДОП, чем это можно сделать при использовании величины T_{is} и тем более величины V_{it} . Если же эти величины определить с учетом арифметических и других операций, необходимых для вычисления значений функции $\varphi(u)$, то сравнение МДОП и ММДОП будет предельно корректным. Однако совершенно ясно, что такое сравнение можно провести только в конкретных случаях, когда нам известна функция $\varphi(u)$. В общем же случае, когда данную функцию мы не знаем, выполнить подобное сравнение в принципе невозможно.

3. Из соотношений (2.1)–(2.9) видно, что уменьшение доступности ММДОП для программной и аппаратной реализаций обусловливается введением в него равенств (2.6)–(2.9), в соответствии с которыми вычисляются веса $v_{a,k-1}$ и $v_{b,k-1}$ значений $\varphi(a_{k-1})$ и $\varphi(b_{k-1})$ функции $y = \varphi(u)$. Как уже отмечено выше, из всех возможных способов, которыми можно воспользоваться для реализации идеи «взвешивания» значений $\varphi(a_{k-1})$ и $\varphi(b_{k-1})$, использование равенств (2.6) и (2.8) является самым простым способом, и, таким образом, предложить какие-либо другие более простые и более доступные для программной и аппаратной реализаций равенства в данном случае невозможно. Однако если более детально рассмотреть данные равенства, то нетрудно обнаружить, что они не являются недоступными для программной и аппаратной реализаций. Действительно, учитывая технические возможности современных средств вычислительной техники, можно заключить, что их можно реализовать как программно, так и аппаратно без существенных затруднений.

4. Как видно из табл. 3.1, использование ММДОП позволяет:

1) вычислять решения уравнения (1.6) [1], устойчивые к ошибкам задания исходных данных и ошибкам вычислений;

2) наряду с приближенными решениями u_k уточнять нижнюю и верхнюю границы интервалов $I_{u,k-1}$, содержащих точное решение u^* уравнения (1.6) [1];

3) регуляризировать вычисляемое приближенное решение данного уравнения.

5. Возможность прогнозирования числа итераций, которое необходимо выполнить для получения приближенного решения u_k , погрешность вычисления которого не превышает некоторое наперед заданное значение, сохраняется и в случае использования ММДОП. Как и в случае использования МДОП, это прогнозирование можно осуществить с помощью неравенства (3.5) [1]. Поскольку скорость сходимости ММДОП заметно выше скорости сходимости МДОП, то очевидно, что точность прогноза оказывается заведомо ниже, чем в случае МДОП.

4. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СРАВНЕНИЯ МДОП И ММДОП

Рассмотрим некоторые результаты экспериментальных исследований, выполненных с целью сравнения скорости сходимости и точности приближенных решений, вычисляемых МДОП и ММДОП, четырех нелинейных уравнений вида (1.6) [1], взятых нами из учебного пособия [11], а выбор их количества и конкретных видов обусловлен прежде всего тем, чтобы провести сравнение данных методов при всех логически возможных типах (классах) монотонных функций скалярных аргументов. Как известно [12–16], типов таких функций 4, и эти типы характеризуются следующими особенностями:

1) монотонно возрастающие функции ($d\varphi/du > 0$) с монотонно возрастающей скоростью ($d^2\varphi/du^2 > 0$);

2) монотонно возрастающие функции ($d\varphi/du > 0$) с монотонно убывающей скоростью ($d^2\varphi/du^2 < 0$);

3) монотонно убывающие функции ($d\varphi/du < 0$) с монотонно возрастающей скоростью ($d^2\varphi/du^2 > 0$);

4) монотонно убывающие функции ($d\varphi/du < 0$) с монотонно убывающей скоростью ($d^2\varphi/du^2 < 0$).

Конкретный вид соотношений, определяющих данные функции и их графики, приведен на рис. 4.1.

Полученные при этом результаты представлены в табл. 4.1.

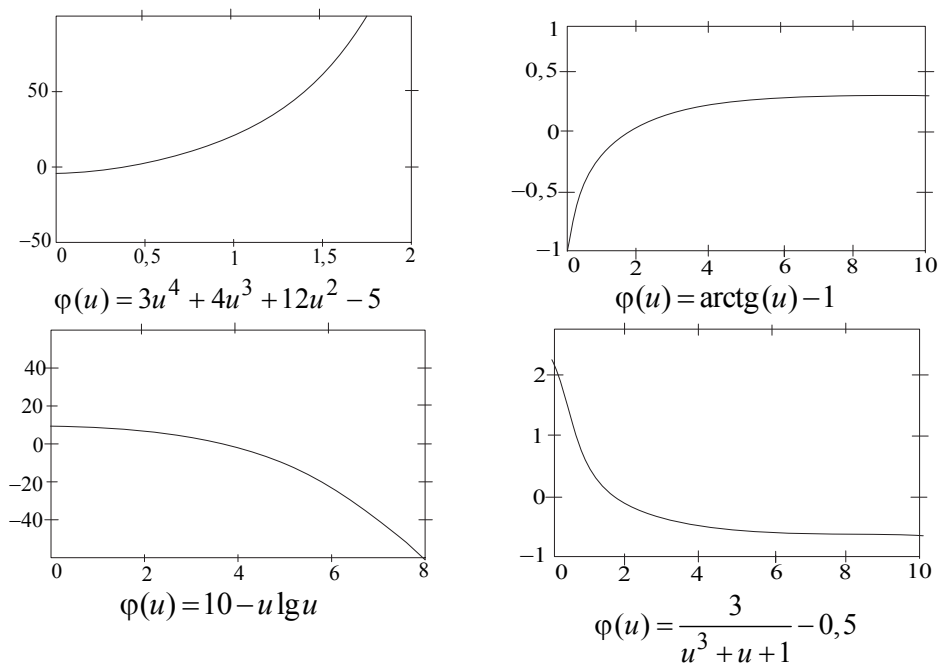


Рис. 4.1. Аналитические и графические представления функций, использованных для получения уравнений

Fig. 4.1. Analytical and graphical representations of the functions used to derive the equations

Таблица 4.1

Table 4.1

Результаты экспериментальных исследований
Experimental research studies

№ п/п	Вид уравнения	Отрезок I_{u0}	Количество итераций		Вычисленное решение	
			ММДОП	МДОП	ММДОП	МДОП
$\Delta u = 1 \cdot 10^{-4}$						
1	$3u^4 + 4u^3 + 12u^2 - 5 = 0$	[0, 1]	11	14	0.5722	0.5722
2	$\text{arctg}(u) - 1 = 0$	[1, 2]	10	14	1.5574	1.5573
3	$3 / (u^3 + u + 1) - 0.5 = 0$	[1, 2]	10	14	1.5160	1.5159
4	$10 - u^2 \log(u) = 0$	[3.5, 5]	7	14	4.0554	4.0555
$\Delta u = 1 \cdot 10^{-7}$						
1	$3u^4 + 4u^3 + 12u^2 - 5 = 0$	[0, 1]	20	24	0.5722032	0.5722033
2	$\text{arctg}(u) - 1 = 0$	[1, 2]	20	24	1.5574076	1.5574077
3	$3 / (u^3 + u + 1) - 0.5 = 0$	[1, 2]	20	24	1.5159802	1.5159802
4	$10 - u^2 \log(u) = 0$	[3.5, 5]	16	24	4.0554170	4.0554171

Окончание табл. 4.1

End of Tab. 4.1

№	Вид уравнения	Отрезок I_{u0}	Количество итераций		Вычисленное решение	
			ММДОП	МДОП	ММДОП	МДОП
$\Delta u = 1 \cdot 10^{-8}$						
1	$3u^4 + 4u^3 + 12u^2 - 5 = 0$	[0, 1]	23	27	0.57220331	0.57220332
2	$\arctg(u) - 1 = 0$	[1, 2]	23	27	1.55740772	1.55740773
3	$3 / (u^3 + u + 1) - 0.5 = 0$	[1, 2]	23	27	1.51598022	1.51598022
4	$10 - u^2 \log(u) = 0$	[3.5, 5]	20	28	4.05541705	4.05541706

Отметим некоторые факты, легко обнаруживаемые при рассмотрении представленных выше результатов.

Во-первых, точности приближенных решений u_k , вычисляемых сравнимыми методами решения нелинейных уравнений, при всех заданных погрешностях Δu оказываются практически одинаковыми для всех типов монотонных функций, и эта равнозначность решений u_k имеет место при изменении задаваемых погрешностей Δu в пределах от $\Delta u = 10^{-4}$ до $\Delta u = 10^{-8}$.

Во-вторых, количество итераций, необходимых для вычисления решений u_k с заданной точностью (с погрешностью, не превышающей заданного значения Δu) при использовании ММДОП, оказывается на 20...50 % меньше, чем в случае использования МДОП, и это неравенство имеет место как при всех задаваемых значениях Δu , так и при всех типах монотонных функций.

Отмеченные выше факты, характеризующие точность приближенных решений и количество итераций, потребовавшихся для их вычисления с применением ММДОП и МДОП, сохраняются и при уменьшении погрешности Δu до $\Delta u = 10^{-13}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты исследований МДОП и ММДОП позволяют заключить следующее:

1) предложенный ММДОП обладает всеми важнейшими свойствами МДОП, и, таким образом, с точки зрения практических приложений он оказывается не менее полезным, чем МДОП;

2) применение ММДОП более предпочтительно по сравнению с МДОП во всех тех случаях, когда наряду с отмеченными выше важнейшими свойствами используемый метод решения нелинейных уравнений должен обеспечивать более высокую скорость сходимости вычисляемых решений к истинным решениям данных уравнений;

3) предложенный ММДОП может быть крайне полезен при создании современных систем автоматического управления различными процессами и объектами, функционирующими в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Майстренко А.В., Майстренко К.А., Светлаков А.А.* Дихотомия. Дихотомия? Дихотомия! Основные положения, проблемы терминологии и инспекционный анализ метода дихотомии // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 4 (80). – С. 93–110.
2. *Майстренко А.В.* Экспериментальные исследования метода автоматического регулирования процессов, основанного на концепции обратных задач динамики // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 27. – С. 176–194.
3. *Cruseanu S.* Régularisation pour les problèmes à opérateurs monotones et la méthode de Galerkin // Commentationes Mathematicae Universitatis Carolinae. – 1971. – Vol. 12, iss. 1. – P. 1–13.
4. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
5. Синтез метода автоматического регулирования процессов, основанного на концепции обратных задач динамики / А.Е. Карелин, А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, С.А. Харитонов // Омский научный вестник. – 2017. – № 4 (154). – С. 83–87.
6. *Майстренко А.В., Светлаков А.А., Старовойтов Н.В.* Цифровое дифференцирование сигналов на основе скользящей квадратичной аппроксимации и его применение в синтезе ПИД-регуляторов // Омский научный вестник. – 2016. – № 1 (145). – С. 73–77.
7. *Майстренко А.В., Светлаков А.А., Старовойтов Н.В.* Цифровое дифференцирование сигналов с применением многоточечных методов в системах автоматического регулирования процессов // Доклады ТУСУР. – 2009. – № 2 (20). – С. 86–89.
8. *Майстренко А.В., Светлаков А.А.* Косвенное измерение расхода жидкости, перекачиваемой насосными агрегатами // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 4 (34). – С. 215–220.
9. *Майстренко А.В., Светлаков А.А., Старовойтов Н.В.* Цифровое дифференцирование измеряемых сигналов с применением интегральных уравнений В. Вольтерра и его регуляризация // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 308–313.
10. *Майстренко А.В., Светлаков А.А., Старовойтов Н.В.* Регуляризация простейшего алгоритма цифрового дифференцирования сигналов // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 4 (25). – С. 53–67.
11. *Воробьева Г.Н., Данилова А.Н.* Практикум по вычислительной математике: учебное пособие для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 208 с.
12. *Демидович Б.П., Марон И.А.* Основы вычислительной математики. – 2-е изд., испр. – М.: Физматгиз, 1963. – 660 с.
13. *Мудров А.Е.* Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: Раско, 1991. – 270 с.
14. *Хемминг Р.В.* Численные методы: для научных работников и инженеров. – 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1972. – 400 с.
15. *Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К.* Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 280 с.
16. *Данилина Н.И., Дубровская Н.С., Кваша О.П.* Численные методы: учебник для техникумов. – М.: Высшая школа, 1976. – 368 с.
17. *Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. – 7-е изд., стер. – М.: Наука, 1970. – 608 с.

Майстренко Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерные системы в управлении и проектировании» Томского государственного университета автоматизированных систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – автоматизация технологических процессов. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: maestro67@mail.ru

Майстренко Константин Андреевич, магистрант кафедры «Компьютерные системы в управлении и проектировании» Томского государственного университета автома-

тизированных систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – автоматизация технологических процессов. E-mail: gos1kk@mail.ru

Светлаков Анатолий Антонович, доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные системы в управлении и проектировании» Томского государственного университета автоматизированных систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – автоматизация технологических процессов. Имеет более 200 печатных работ и учебных пособий. E-mail: svetlakov38@mail.ru

Maistrenko Andrey V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Systems in Management and Design of Tomsk State University of Automated Control Systems and Radioelectronics. His research interests are currently focused on automation of technological processes. He has more than 50 publications and teaching manuals. E-mail: maestro67@mail.ru

Maistrenko Konstantin A., Bachelor of Technical Sciences, Undergraduate, Department of Computer Systems in Management and Design of Tomsk State University of Automated Control Systems and Radioelectronics. His research interests are currently focused on automation of technological processes. E-mail: gos1kk@mail.ru

Svetlakov Anatoliy A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Systems in Management and Design of Tomsk State University of Automated Control Systems and Radioelectronics. His research interests are currently focused on automation of technological processes. He has more than 200 publications and teaching manuals. E-mail: svetlakov38@mail.ru).

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-85-102

Dichotomy. Dichotomy? Dichotomy! A modified method of dichotomy for solution of nonlinear scalar equations and some results of its investigation*

A.V. MAISTRENKO¹, K.A. MAISTRENKO², A.A. SVETLAKOV³

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Prospect, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a *maestro67@mail.ru* ^b *gos1kk@mail.ru* ^c *svetlakov38@mail.ru*

Abstract

Introduction: when creating modern automatic control systems for various processes and objects operating in real time, very often one has to face the problem of solving various kinds of nonlinear scalar equations. In the first part of this work entitled “Dichotomy. Dichotomy? Dichotomy!: fundamentals, terminology problems and inspection analysis of the dichotomy method”, a modified version of the dichotomy method was proposed, which has all the main advantages of the modified method. This method has a number of advantages in comparison with other methods for solving nonlinear equations, but at present it has not found wide practical use. The main reason for its low popularity is a low rate of convergence of the sequence of approximate solutions, and a large amount of computation required to obtain sufficiently accurate solutions. Purpose of the study: to propose a modified version of the dichotomy method, which allows one to obtain more rapidly converging sequences of approximate solutions to nonlinear scalar equations and requires significantly less computations required to obtain solutions with the desired accuracy, to illustrate, a higher convergence rate of the sequence of approximate solutions calculated using the modified dichotomy method by solving a number of specific nonlinear equations and, thereby, to substantiate the advantage of the new method for

* Received 26 November 2020.

its use in creating various automatic control and regulation systems. Results: a modification of the method for dividing a segment in half is proposed, which has all the main advantages of the modified method. The results of solving 4 nonlinear equations are presented illustrating a higher rate of convergence of solutions calculated using the proposed modification. Practical significance: the research results can be used in the development of modern automatic control systems for various technological processes and objects.

Keywords: dichotomy, robustness, modification, convex combination of points, weights of function values, regularization, automatic control, derivative

REFERENCES

1. Maistrenko A.V., Maistrenko K.A., Svetlakov A.A. Dikhotomiya. Dikhotomiya? Dikhotomiya! Osnovnye polozheniya, problemy terminologii i inspektsionnyi analiz metoda dikhotomii [Dichotomy. Dichotomy? Dichotomy! Basic provisions, problems of terminology and inspection analysis of the method of dichotomy]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (80), pp. 93–110.
2. Maistrenko A.V. Eksperimental'nye issledovaniya metoda avtomaticheskogo regulirovaniya protsessov, osnovannogo na kontseptsii obratnykh zadach dinamiki [Experimental researches of the method of automatic regulation of processes based on the concept of reverse dynamics problems]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya = Perm National Research Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, 2018. no. 27, pp. 176–194.
3. Cruceanu S. Régularisation pour les problèmes à opérateurs monotones et la méthode de Galerkin. *Commentationes Mathematicae Universitatis Carolinae*, 1971, vol. 12, iss. 1, pp. 1–13.
4. Rabiner L., Gold B. *Theory and application of digital signal processing*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1975 (Russ. ed.: Rabiner L., Gould B. *Teoriya i primeneniye tsifrovoi obrabotki signalov*. Moscow, Mir Publ., 1978. 848 p.).
5. Karelin A.E., Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Kharitonov S.A. Sintez metoda avtomaticheskogo regulirovaniya protsessov, osnovannogo na kontseptsii obratnykh zadach dinamiki [Synthesis of the method of automatic control of processes based on the concept of inverse problems of dynamics]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 4 (154), pp. 83–87.
6. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoe differentsirovanie signalov na osnove skol'zyashchei kvadrachnoi approksimatsii i ego primeneniye v sinteze PID-regulyatorov [Digital differentiation of signals based on sliding quadratic approximation and its use in the synthesis of PID-regulators]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 1 (145), pp. 73–77.
7. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoe differentsirovanie signalov s primeneniem mnogotochechnykh metodov v sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniya protsessov [Digital signal differentiation using multipoint methods in automatic process control systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2009, no. 2 (20), pp. 86–89.
8. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A. Kosvennoe izmereniye raskhoda zhidkosti perekachivaemoy nasosnymi agregatami [Indirect measurement of fluid flow pumped pumping units]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 4 (34), pp. 215–220.
9. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoe differentsirovanie izmeryаемых signalov s primeneniem integral'nykh uravnenii V. Vol'terra i ego regulyazatsiya [Digital differentiation of measured signals using V. Volterra integral equations and its regularization]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2 (120), pp. 308–313.
10. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Regulyazatsiya prosteishego algoritma tsifrovogo differentsirovaniya signalov [Regularization of the elementary algorithm of digital

differentiation of signals]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 4 (25), pp. 53–67.

11. Vorob'eva G.N., Danilova A.N. *Praktikum po vychislitel'noi matematike* [Computational mathematics workshop]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 208 p.

12. Demidovich B.P., Maron I.A. *Osnovy vychislitel'noi matematiki* [Fundamentals of computational mathematics]. 2nd ed. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 660 p.

13. Mudrov A.E. *Chislennyye metody dlya PEVM na yazykakh Beisik, Fortran i Paskal'* [Numerical methods for PCs in BASIC, Fortran and Pascal]. Tomsk, Rasko Publ., 1991. 270 p.

14. Hamming R.W. *Chislennyye metody: dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Numerical methods for scientists and engineers]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1972. 400 p. (In Russian).

15. Forsythe G.E., Malcolm M.A., Moler C.B. *Computer methods for mathematical computations*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1977 (Russ. ed.: Forsait Dzh., Mal'kol'm M., Moulер K. *Mashinnye metody matematicheskikh vychislenii*. Moscow, Mir Publ., 1980. 280 p.).

16. Danilina N.I., Dubrovskaya N.S., Kvasha O.P. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976. 368 p.

17. Fikhtengol'ts G.M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya*. T. 1 [The course of differential and integral calculus. Vol. 1]. 7th ed. Moscow, Nauka Publ., 1970. 608 p.

Для цитирования:

Майстренко А.В., Майстренко К.А., Светлаков А.А. Дихотомия. Дихотомия? Дихотомия! Модифицированный метод дихотомии решения нелинейных скалярных уравнений и некоторые результаты его исследований // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 85–102. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-85-102.

For citation:

Maistrenko A.V., Maistrenko K.A., Svetlakov A.A. Dikhotomiya. Dikhotomiya? Dikhotomiya! Modifitsirovannyi metod dikhotomii resheniya nelineinykh skalyarnykh uravnenii i nekotorye rezultaty ego issledovaniy [Dichotomy. Dichotomy? Dichotomy! A modified method of dichotomy for solution of nonlinear scalar equations and some results of its investigation]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 85–102. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-85-102.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.434:004.942

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-103-122

Язык моделирования гетерогенных динамических систем LISMA_HDS*

Е.А. ПОПОВ^а, Ю.В. ШОРНИКОВ^б

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

^а e.popov@corp.nstu.ru ^б shornikov@inbox.ru

Гетерогенные динамические системы (ГДС) описывают одновременно протекающие процессы различной физической природы. Такие системы встречаются в многочисленных приложениях науки и техники. Можно выделить следующие характерные особенности ГДС. Часто такие системы оказываются многорежимными или гибридными. В общем случае их режимы задаются в классе задачи Коши для неявных дифференциально-алгебраических систем уравнений. В связи с наличием нескольких разнородных динамических компонентов или процессов, протекающих как во времени, так и в пространстве, размерность совокупной системы уравнений может быть достаточно высокой. В некоторых случаях система уравнений имеет внутреннюю структуру, например, дифференциально-алгебраическая система уравнений, аппроксимирующая дифференциальное уравнение в частных производных по методу прямых. Тогда имеется возможность компактной алгоритмической записи исходной громоздкой системы уравнений. Также в гетерогенных гибридных динамических системах могут возникать события качественно разных типов. Поэтому появляется необходимость в применении разных численных алгоритмов обнаружения событий.

Сегодня компьютерное моделирование ГДС выполняется в окружении инструментальных средств. Широко используемые инженерами языки моделирования не позволяют в полной мере отразить все свойства систем из этого класса. Например, в них отсутствует возможность типизации событий.

Поэтому был разработан декларативный язык моделирования общего назначения LISMA_HDS инструментальной среды ИСМА, учитывающий вышеуказанные характерные особенности ГДС. Новый язык включает возможности непосредственного или алгоритмического объявления модельных постоянных, задачи Коши для неявной дифференциально-алгебраической системы уравнений, начальных приближений переменных, а также позволяет задавать явные события времени, режимы функционирования и переходы между ними по событиям разных типов, использовать макроподстановки и реализовывать событийное управление.

LISMA_HDS задан с помощью порождающей грамматики в расширенной форме Бэкуса–Науэра и семантических ограничений. Доказана принадлежность порождающей грамматики к подклассу LL(2) контекстно-свободных грамматик.

* *Статья получена 28 октября 2020 г.*

Ключевые слова: гетерогенные динамические системы, гибридные динамические системы, языки моделирования, типизация событий, формальные грамматики, инструментальная среда ИСМА

ВВЕДЕНИЕ

Гетерогенные динамические системы (ГДС) описывают одновременно протекающие процессы различной физической природы. Такие сложные системы находят применение во многих областях науки и техники: в автоматике, робототехнике, электроэнергетике, автомобилестроении, ракетостроении и т. д.

В общем случае ГДС характеризуются *высокой размерностью* в связи с наличием нескольких составляющих элементов. Это свойство особенно проявляется в случае, когда часть из них моделируют процессы, протекающие во времени и пространстве. Соответствующие дифференциальные уравнения в частных производных после пространственной дискретизации становятся системами обыкновенных дифференциальных уравнений высокой размерности [1].

Часто системы уравнений высокой размерности имеют некоторую внутреннюю структуру, позволяющую описать их в компактной форме с использованием *циклов* и *индексной записи* (например, система обыкновенных дифференциальных уравнений, аппроксимирующая дифференциальное уравнение в частных производных по методу прямых) [2, 3].

Дифференциально-алгебраические системы уравнений (ДАУ) являются естественной формой описания процессов самой различной природы. Они возникают, когда на фазовые переменные накладываются ограничения, например, в соответствии с законом сохранения массы [4]. Более того, при составлении совокупной системы уравнений сложной системы из моделей элементов и уравнений связей между ними в общем случае неизбежно возникает *неявная система ДАУ* [3].

С другой стороны, ГДС часто оказываются дискретно-непрерывными или *гибридными*. Гибридные системы (ГС) представляются в виде нескольких непрерывных режимов функционирования, между которыми определены переходы, условия их срабатывания и мгновенные действия при срабатывании (например, изменение значений переменных или изменение системы уравнений, описывающей режимное поведение) [4–6]. Переключение между режимами происходит мгновенно. В момент переключения непрерывное время останавливается, выполняются все переходы, условия которых истинны, и только потом продолжается процесс, описываемый активной системой уравнений.

Если хотя бы один элемент ГДС является гибридным, то и вся совокупная система также характеризуется гибридным поведением. Тогда режим гетерогенной гибридной динамической системы может быть представлен в общем случае в виде задачи Коши для неявной системы ДАУ с ограничением:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(t, \mathbf{y}(t), \mathbf{y}'(t)) &= 0, \\ \mathbf{y}(t_0) &= \mathbf{y}_0, \quad \mathbf{y}'(t_0) = \mathbf{y}'_0, \\ pr(t, \mathbf{y}(t)) &= \text{true}, \quad t \in [t_0, t^*), \end{aligned} \tag{1}$$

где $\mathbf{F}: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$ – вектор-функция, удовлетворяющая условиям существования и единственности решения задачи Коши для соответствующей системы ДАУ на интервале $[t_0, t^*]$ [1]; t – независимая переменная (время); $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^N$ – вектор состояния системы; $\mathbf{y}_0, \mathbf{y}'_0 \in \mathbb{R}^N$ – согласованные начальные условия, т. е. $\mathbf{F}(t_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{y}'_0) = \mathbf{0}$; $pr: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^N \rightarrow \{\text{false}, \text{true}\}$ – режимный предикат; t_0 – момент времени входа в текущий режим; t^* – момент времени переключения в следующий режим.

Пока ГС находится в текущем режиме, режимный предикат остается истинным. В момент времени t^* , когда pr впервые становится ложным, ГС переходит в следующий режим. Режимный предикат составляется из ограничений $g(t, \mathbf{y}(t)) < 0$ на непрерывные событийные функции $g: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$, соединенные логическими операторами конъюнкции и дизъюнкции.

В условиях машинной арифметики точное определение момента переключения t^* не является практически возможным. Поэтому выделяют три типа событий: односторонние, двусторонние, критичные к точности обнаружения [7]. Так как в общем случае невозможно найти момент времени t^* с использованием аналитических методов, применяют численные алгоритмы обнаружения событий. Однако не все алгоритмы гарантируют обнаружение в случае множественных пересечений границы режима в пределах одного шага интегрирования. Поэтому в рамках методологии комплексного обнаружения событий, когда используется несколько одновременно работающих алгоритмов обнаружения, можно также выделить класс труднообнаруживаемых событий [8]. Наличие *событий разных типов* – одна из ключевых особенностей гетерогенных ГС.

1. ЯЗЫК МОДЕЛИРОВАНИЯ LISMA_HDS

В настоящее время сложно представить проектирование или анализ сложной системы без применения компьютерного моделирования. Сегодня инженерам доступны инструментальные среды, автоматизирующие трудоемкий и подверженный ошибкам процесс построения компьютерной модели и выполнения вычислительного эксперимента с ней. Обычно изучаемая система представляется в виде текстовой модели на некотором языке моделирования.

Язык моделирования ГДС должен учитывать их особенности и включать удобные и интуитивно понятные конструкции. Более того, он должен быть простым для предметного пользователя. Большое количество ключевых слов и языковых конструкций, применение таких высокоуровневых парадигм, как объектно-ориентированность, повышают порог вхождения для предметного специалиста без углубленных знаний программирования. Примером может служить язык моделирования Modelica [9], на базе которого построены инструментальные среды Dymola, OpenModelica, Wolfram SystemModeler. В широко распространенном среди инженеров программном комплексе Matlab/Simulink используются базовые текстовый язык программирования и графический язык структурных схем, обладающий известными

недостатками при физическом моделировании сложных динамических систем [3, 5]. С другой стороны, ни один из массово используемых языков моделирования не позволяет описать все свойства ГДС (например, указать типы событий).

Порождающая грамматика языка моделирования должна быть в одном из известных и хорошо изученных подклассов контекстно-свободных грамматик, для которых доказана однозначность, например, LL(k) [10, 11].

Более того, для них могут быть сконструированы эффективные нисходящие безвозвратные синтаксические анализаторы с линейной зависимостью времени работы от длины входной цепочки [12].

Рассмотрим декларативный язык моделирования общего назначения LISMA_HDS инструментальной среды ИСМА [6], учитывающий все вышеуказанные особенности ГДС.

Отличительными особенностями языка LISMA_HDS, как и в случае LISMA_PDE [13], являются запись математических конструкций в близкой к языку математики форме, а также отсутствие повышенных требований к навыкам программирования у предметного пользователя.

Ниже приведены ключевые продукции порождающей грамматики $G[\text{модель}]$ языка LISMA_HDS в расширенной форме Бэкуса–Науэра в соответствии со стандартом ISO/IEC 14977:1996 [14]. В левых частях правил в скобках приводятся сокращенные имена нетерминальных символов грамматики.

Программные модели (*модель*) на LISMA_HDS являются последовательностями объявлений, возможно, пустыми:

$$\text{модель}(M1) = \{\text{объявление}\};$$

$$\begin{aligned} \text{объявление}(D1) = & \text{пост_об} \mid \text{уравнение} \mid \text{нач_усл} \mid \text{режим} \\ & \mid \text{соб_упр} \mid \text{макрос} \mid \text{цикл} \mid \text{цикл_соб}; \end{aligned}$$

Язык LISMA_HDS содержит конструкции для непосредственного или алгоритмического объявления программных постоянных, задачи Коши для неявной системы ДАУ, начальных приближений переменных, а также позволяет задавать явные события времени, режимы функционирования и переходы между ними по событиям разных типов, макроподстановки и реализовывать событийное управление. Поддерживаются как однострочные, так и многострочные комментарии в стиле языка C++.

Рассмотрим разные типы объявлений отдельно в рамках подзадач описания непрерывного и дискретного поведения ГС.

2. СПЕЦИФИКАЦИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Непрерывное поведение может быть в общем случае описано системой уравнений вида

$$G(t, \mathbf{y}(t), \mathbf{y}'(t)) = H(t, \mathbf{y}(t), \mathbf{y}'(t)), \quad (2)$$

которая может быть легко приведена к виду (1), где $F(t, \mathbf{y}(t), \mathbf{y}'(t)) = G(t, \mathbf{y}(t), \mathbf{y}'(t)) - H(t, \mathbf{y}(t), \mathbf{y}'(t))$.

Уравнения системы (2) описываются на LISMA_HDS в соответствии с грамматикой

$$\text{уравнение}(E1) = [\text{идент}, ":", "], AB, "=", AB, ";";$$

где нетерминальный символ AB , определенный далее по тексту, представляет собой арифметическое выражение, которое может включать фазовые переменные, их производные (имя переменной с последующим символом '), встроенную переменную модельного времени $time$, числовые литералы, встроенные и объявленные постоянные, а также вызовы встроенных математических функций; терминальный символ *идент* – идентификатор.

Метки перед уравнениями (идентификаторы) используются, когда необходимо указать на конкретные уравнения при изменении совокупной системы в момент входа в новый режим. Несколько уравнений могут иметь одинаковые метки.

Могут быть заданы как точные начальные условия задачи Коши, так и некоторые приближения к ним, которые в дальнейшем будут уточнены в процессе инициализации:

$$\text{нач_усл}(I1) = \text{перем_имя}, "(", "t0", ")", ("=" | "~="), AB, ";";$$

где нетерминальный символ *перем_имя* означает имя переменной.

Если не задано начальное значение переменной, то на этапе инициализации в качестве начального приближения будет использоваться ноль.

При инициализации в исходном режиме *init* могут применяться только арифметические выражения, состоящие из числовых литералов и именованных постоянных величин.

Грамматика объявления постоянных величин имеет вид

$$\text{пост_об}(C1) = \text{"const"}, \text{цеп_присв}, \{",", \text{цеп_присв}\}, ";";$$

$$\text{цеп_присв}(A1) = \text{перем_имя}, "=", \text{цеп_присв_хв};$$

$$\text{цеп_присв_хв}(A4) = AB | \text{цеп_присв};$$

где AB должно быть составлено только из объявленных и встроенных постоянных, а также числовых литералов.

LISMA_HDS позволяет задавать системы уравнений, начальные условия, постоянные, макроподстановки (*макрос*) и блоки событийного управления (*соб_упр*) алгоритмически с помощью цикла *for* и индексной записи:

$$\text{цикл}(C2) = \text{"for"}, \text{идент}, "=", \text{мн_знач}, \{",", \text{мн_знач}\}, \text{цикл_тел};$$

$$\text{мн_знач}(V2) = \text{ЦБЗ}, [":", \text{ЦБЗ}], [":", \text{ЦБЗ}];$$

$$\text{цикл_тел}(C3) = \{",", \{\text{пост_об} | \text{макрос} | \text{уравнение} | \text{нач_усл} | \text{соб_упр}\}, "};$$

где терминальный символ *ЦБЗ* означает целое число без знака.

Заголовок цикла включает в себя переменную цикла (идентификатор) и множество ее значений Ω , определенное одной или несколькими тройками разделенных двоеточиями чисел l, s, r (*мн_знач*), означающих начальное значение переменной, шаг приращения и конечное значение соответственно: $\Omega = \bigcup_{i=1}^{N \in \mathbb{Z}_+} \Omega_i$, $\Omega_i = \{\omega_j = l_i + s_i j \mid j \in \mathbb{Z}_+ \cup \{0\} \wedge \omega_j \leq r_i\}$, $l_i, r_i \in \mathbb{Z}_+ \cup \{0\}$, $s_i \in \mathbb{Z}_+$, $l_i \leq r_i$. Шаг может быть опущен, тогда он по умолчанию будет установлен равным единице. Вместе с шагом также может быть опущена правая граница, что приведет к автоматической установке $r_i = l_i$ и итоговому множеству Ω_i с единственным элементом l_i .

Переменная цикла может быть использована внутри цикла как обычная переменная в арифметических выражениях и в качестве индекса вместе с обычной переменной:

перем(V1) = *перем_имя*, [""];

перем_имя(V3) = *перем_инд* | *идент*;

перем_инд = *идент*, "[", *индекс*, "]", [*хвост*];

индекс = [*ЦБЗ*, "*"], *идент*, [*add_on*, *ЦБЗ*];

add_on = "+" | "-" ;

хвост = *идент* | *ЦБЗ*;

где терминальный символ *перем_инд* представляет собой имя переменной с индексом.

Как показано выше, в качестве индекса допускается использование простых арифметических выражений типа $2 * i + 1$, $i - 3$, i . Так как индексная запись является фактически манипуляцией с идентификаторами, индекс можно размещать внутри составного имени переменной, например, $u[i]0$, что в случае нулевого значения переменной цикла i приведет к использованию переменной с именем $u00$.

Например, задача Коши

$$x_1'(t) = x_2(t), \quad x_1(t_0) = 1,$$

$$x_2'(t) = x_3(t), \quad x_2(t_0) = 2,$$

$$x_3'(t) = x_4(t), \quad x_3(t_0) = 3,$$

$$x_4'(t) = x_5(t), \quad x_4(t_0) = 4,$$

$$x_5'(t) = x_1(t), \quad x_5(t_0) = 5$$

может быть описана на LISMA_HDS в виде программной модели, представленной на рис. 1.

```

1  for i = 1:4
2  {
3      x_[i]' = x_[i+1];
4      x_[i](t0) = i;
5  }
6  x_5' = x_1;
7  x_5(t0) = 5;

```

Рис. 1. Программная модель с алгоритмическим определением задачи Коши

Fig. 1. A program model with an algorithmically defined initial value problem

В язык встроены некоторые часто используемые математические функции, например, модуля ($\text{abs}(x)$), экспоненциальная ($\text{exp}(x)$), максимума двух чисел ($\text{max}(x, y)$), минимума двух чисел ($\text{min}(x, y)$), степенная ($\text{pow}(x, y)$), квадратного корня ($\text{sqrt}(x)$), тригонометрические ($\text{sin}(x)$, $\text{cos}(x)$, $\text{tg}(x)$, $\text{ctg}(x)$).

Грамматика вызова встроенной функции имеет вид

вызов(I3) = *модуль* |...| *экспонента*;

модуль(A2) = "abs", "(", AB, ")";

экспонента(A3) = "exp", "(", AB, ")";

Рассмотрим простой пример неявной системы ДАУ. Имеется идеальный математический маятник – груз массой m , прикрепленный к подвижному шарниру при помощи жесткого недеформируемого стержня нулевой массы длиной l (рис. 2). Маятник находится в поле тяготения Земли, которое в рассматриваемой области пространства будем считать равномерным. На груз действует сила тяжести $m\mathbf{g}$ и усилие в стержне \mathbf{T} . Совместим начало декартовой системы координат и положение шарнира. Пусть в начальный момент времени t_0 груз находится в точке (x_0, y_0) , а его скорость равняется (v_{x_0}, v_{y_0}) . Пренебрегая силой сопротивления среды и трением в шарнире, получим задачу Коши

$$\begin{aligned}
 mv_x'(t) &= -T(t) \frac{x(t)}{l}, & v_x(t_0) &= v_{x_0}, \\
 x'(t) &= v_x(t), & x(t_0) &= x_0, \\
 mv_y'(t) &= -T(t) \frac{y(t)}{l} - mg, & v_y(t_0) &= v_{y_0}, \\
 y'(t) &= v_y(t), & y(t_0) &= y_0, \\
 x^2(t) + y^2(t) &= l^2.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Математическая модель (3) может быть представлена на LISMA_HDS, как показано на рис. 3.

Строки 1, 2 отвечают за определение постоянных модели – массы маятника m и длины стержня l . Ускорение g является встроенной постоянной языка.

Строки 4, 6, 8, 10, 11 описывают систему уравнений в соответствии с математической моделью. Производные обозначаются традиционным для языка математики символом '.

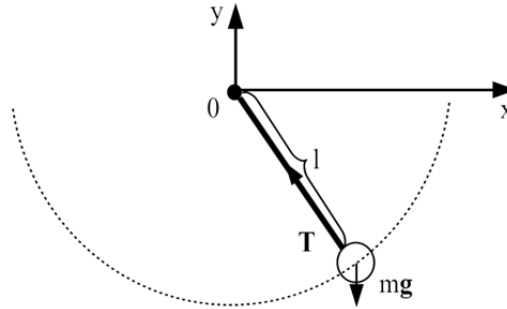


Рис. 2. Идеальный математический маятник

Fig. 2. A simple gravity pendulum

В строках 5 и 7 заданы точные начальные значения переменных x и v_x соответственно. Для y в строке 7 задано начальное приближение; v_y и T автоматически получают 0 в качестве начальных приближений.

```

1  const l = 5.0;    // длина стержня
2  const m = 1.0;   // масса маятника
3
4  x' = v_x;
5  x(t0) = 4.0;
6  y' = v_y;
7  y(t0) ~- -3.0;
8  m * v_x' = -T * x / l;
9  v_x(t0) = 0.0;
10 m * v_y' = -T * y / l - m * g;
11 x * x + y * y = l * l;

```

Рис. 3. Программная модель идеального математического маятника

Fig. 3. A program model of the simple gravity pendulum

Результаты вычислительного эксперимента с программной моделью на временном интервале $[0;10]$ представлены на рис. 4.

Также LISMA_HDS содержит возможность задания макроподстановок, которые позволяют выделять общие части арифметических выражений в отдельную программную единицу с мнемоническим именем. Макроподстановки объявляются в соответствии с грамматикой

$$\text{макрос}(\text{M3}) = \text{"macro"}, \text{перем_имя}, \text{"="}, \text{AB}, \text{";"}$$

Макроподстановки не являются уравнениями системы, а подстановка соответствующего арифметического выражения осуществляется во время формирования исполняемой модели.

Например, программная модель маятника, представленная на рис. 3, может быть записана с применением макроподстановок, как показано на рис. 5.

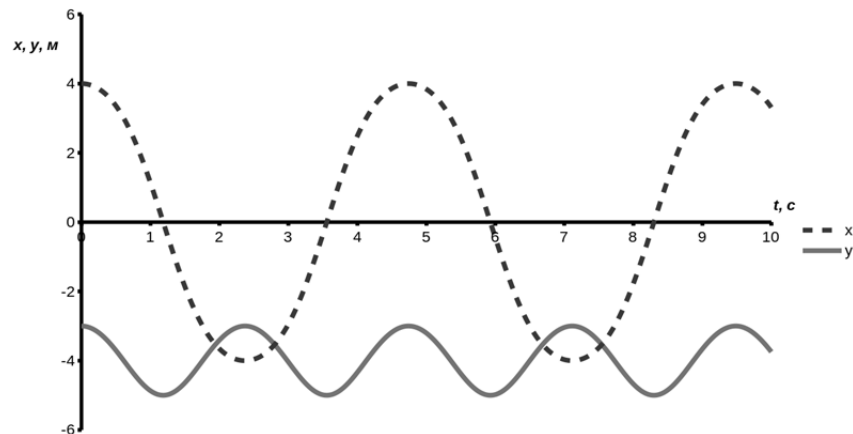


Рис. 4. Результаты расчета идеального маятника

Fig. 4. Simulation results of the simple gravity pendulum calculation

```

1  const l = 5.0;    // длина стержня
2  const m = 1.0;   // масса маятника
3
4  macro TLM = T / (l * m);
5
6  x' = v_x;
7  x(t0) = 4.0;
8  y' = v_y;
9  y(t0) ~ = -3.0;
10 v_x' = -TLM * x;
11 v_x(t0) = 0.0;
12 v_y' = -TLM * y - g;
13 x * x + y * y = l * l;

```

Рис. 5. Программная модель идеального математического маятника с макроподстановкой

Fig. 5. A program model of the simple gravity pendulum with a macro

3. СПЕЦИФИКАЦИЯ ДИСКРЕТНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Дискретное поведение ГС заключается в смене режимов при наступлении определенных событий.

Грамматика режима ГС на LISMA_HDS имеет вид

режим(M2) = "state", *идент*, "(", *ЛВ*, ")", *реж_тел*, [*реж_ист*];

Описание режима ГС начинается с ключевого слова *state*. Следом идет имя режима (идентификатор) и логическое выражение (*ЛВ*) в круглых скобках.

После предиката указывается тело режима, состоящее из набора уравнений, начальных условий и операторов удаления уравнений (*ур_удал*):

$$\text{реж_тел (M4)} = \{ \{ \text{уравнение} | \text{нач_усл} | \text{ур_удал} \}, \{ \};$$

$$\text{ур_удал (D2)} = \text{"delete"}, (\text{"*" | стис_мет}), \{ \};$$

$$\text{стис_мет (L1)} = \text{идент}, \{ \{ \text{идент} \}, \{ \};$$

Оператор `delete` позволяет удалить все (*) или только указанные путем перечисления их меток уравнения из совокупной системы.

Объявление уравнений с уже существующей меткой приведет к замене всех старых уравнений с этой меткой в совокупной системе на новые с той же самой меткой.

Объявление уравнения без метки или с неиспользованной ранее меткой означает его добавление в совокупную систему.

Добавление или замена уравнения, задание начального значения переменной в режиме приводят к необходимости проведения инициализации.

После тела режима указываются режимы, из которых в него можно перейти, в соответствии с грамматикой

$$\text{реж_ист (M5)} = \text{"from"}, \text{реж_имя}, \{ \{ \text{реж_имя} \}, \{ \};$$

$$\text{реж_имя (M6)} = \text{идент} | \text{"init"};$$

Если опустить конструкцию `from`, режим будет достижим из любого другого.

Логические выражения с типом событий (*ЛВ*) описываются следующей грамматикой:

$$\text{ЛВ (E3)} = \text{ЛВТ}, \{ \text{или_оп}, \text{ЛВТ} \};$$

$$\text{или_оп} = \text{"or"} | \text{"OR"} | \text{"|"} | \text{"|"};$$

$$\text{ЛВТ (E4)} = \text{ЛВП}, \{ \text{u_оп}, \text{ЛВП} \};$$

$$\text{u_оп} = \text{"and"} | \text{"AND"} | \text{"\&\&"};$$

$$\text{ЛВП (E5)} = \text{ЛВС}, \{ \text{рав_оп}, \text{ЛВС} \};$$

$$\text{рав_оп} = \text{"="} | \text{"!="} | \text{"="};$$

$$\text{ЛВС (E6)} = \text{АВА}, \{ \text{отн_оп}, \text{АВА} \};$$

$$\text{отн_оп} = \text{"<="} | \text{">="} | \text{"<"} | \text{">"};$$

$$\text{АВА (E7)} = \text{АВМ}, \{ \text{add_оп}, \text{АВМ} \};$$

$$\text{АВМ (E8)} = \text{УАВ}, \{ \text{mul_оп}, \text{УАВ} \};$$

$$\text{mul_оп} = \text{"*"} | \text{" / "};$$


```

YAB(E9) = add_on, YAB|YAB2;
YAB2(E10) = ne_on, YAB|операнд;
    ne_on = "not"|"NOT"|"!";
операнд(O1) = "(", AB, ")"|перем|литерал|вызов|типизация;
литерал(L2) = ЦБЗ|вещ_число;
типизация(T1) = тип_соб, "(", ЛВ, ")";
тип_соб(T2) = одн_соб|дву_соб|тпру_соб|кри_соб;
    одн_соб = "unilateral"|"UNILATERAL";
    дву_соб = "bilateral"|"BILATERAL";
    тпру_соб = "shortliving"|"SHORTLIVING";
    кри_соб = "ordinary"|"ORDINARY";
AB(E2) = ЛВ;

```

Таким образом, имеется возможность указать, что все событийные функции, входящие в предикат, описывают односторонние (*одн_соб*), двусторонние (*дву_соб*), труднообнаруживаемые (*тпру_соб*), критичные к точности обнаружения (*кри_соб*) события. По умолчанию события являются критичными к точности обнаружения. Тип события может быть указан только в логическом выражении конструкции `state`. В логические выражения не могут входить производные переменных системы.

Если ограничение на событийную функцию попадает под действие нескольких указателей типа события, то его типом считается ближайший, а остальные игнорируются. Например, предикат

$$\text{unilateral}(x < 0 \text{ and } \text{bilateral}(y < 0))$$

эквивалентен предикату без вложенных указателей типа

$$\text{unilateral}(x < 0) \text{ and } \text{bilateral}(y < 0).$$

В качестве примера ГС рассмотрим математический маятник из предыдущего раздела, но уже с горизонтальной недеформируемой пластиной бесконечной длины на уровне $h = 0$, к которой прикреплен шарнир маятника (рис. 6). При столкновении с пластиной происходит абсолютно упругий отскок груза и последующее мгновенное разрушение стержня маятника.

Диаграмма состояний системы представлена на рис. 7, где условие перехода указано над стрелкой. Гибридная система начинает в режиме `init`, моделирующем движение маятника до разрушения.

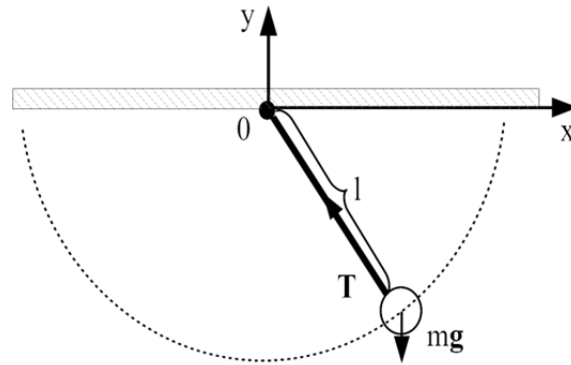


Рис. 6. Идеальный математический маятник с ограничением

Fig. 6. A simple gravity pendulum with an obstacle

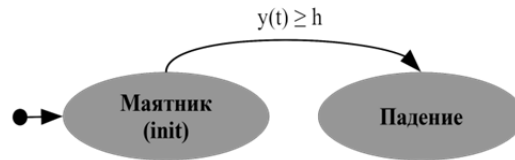


Рис. 7. Диаграмма состояний маятника с ограничением

Fig. 7. A state chart of the simple gravity pendulum with an obstacle

Режим «Маятник» имеет вид (3), но с дополнительным ограничением:

$$pr_1(y(t)) : y(t) - h < 0.$$

После столкновения в момент времени t^* система переходит в режим «Падение»:

$$v_x'(t) = 0, \quad v_x(t^*) = -v_x(t^* - 0),$$

$$x'(t) = v_x(t), \quad x(t^*) = x(t^* - 0),$$

$$v_y'(t) = -g, \quad v_y(t^*) = -v_y(t^* - 0),$$

$$y'(t) = v_y(t), \quad y(t^*) = y(t^* - 0),$$

$$pr_2(t) : \text{true},$$

где $a(t^* - 0)$ означает финальное значение переменной a в предыдущем режиме.

Рассмотрим программную модель системы на LISMA_HDS, представленную на рис. 8.

```

1  const l = 5.0;    // длина стержня
2  const m = 1.0;    // масса маятника
3  const h = 0.0;    // высота препятствия
4
5  x' = v_x;
6  x(t0) = 4.0;
7  y' = v_y;
8  y(t0) ~ = -3.0;
9  eqs: m * v_x' = -T * x / l;
10 v_x(t0) = -5.0;
11 eqs: m * v_y' = -T * y / l - m * g;
12 cst: x * x + y * y = l * l;
13
14 state Falling(unilateral(y >= h))
15 {
16     x(t0) = -5.0;
17     y(t0) = h;
18     v_x(t0) = 0.0;
19     v_y(t0) = -v_y;
20
21     delete cst;
22 eqs: v_x' = 0.0;
23 eqs: v_y' = -g;
24 }
25 from init;

```

Рис. 8. Программная модель идеального математического маятника с ограничением

Fig. 8. A program model of the simple gravity pendulum with an obstacle

Строки 5–12 определяют локальное поведение ГС в режиме «Маятник» (*init*), где *init* – имя встроенного режима, в котором начинается вычислительный эксперимент.

Как только становится истинным условие $y \geq h$ с учетом односторонности события (указатель типа *unilateral*), выполняется переход в режим «Падение», описанный строками 14–25. Переход возможен только из режима *init*, что отражено в строке 25. При переходе удаляется уравнение-ограничение *cst*, заменяются дифференциальные уравнения *eqs*, включающие компоненты вектора скорости. Вертикальный компонент скорости меняет свой знак на противоположный в строке 19. Остальным переменным присваиваются новые явно заданные значения в строках 16–18. Это выполняется из-за невозможности идеально точного обнаружения события в связи с ограниченностью разрядной сетки компьютера.

На рис. 9 представлены результаты вычислительного эксперимента с моделью на временном интервале $[0; 2]$.

Кроме возможности объявления режима, LISMA_HDS также поддерживает событийное управление [15]. Оно позволяет выполнять некоторые действия в начале каждого шага интегрирования, если соответствующее условие истинно. Причем введение в модель событийного управления не приводит к появлению отдельного режима или событийных функций. Поэтому алгоритмы обнаружения событий в таком случае не используются. Событийное управление осуществляется с помощью известной конструкции *if-else*:

```
соб_упр (I2) = "if", "(", ЛВ, ")", реж_тел, [иначе];
```

```
иначе (I4) = "else", реж_тел;
```

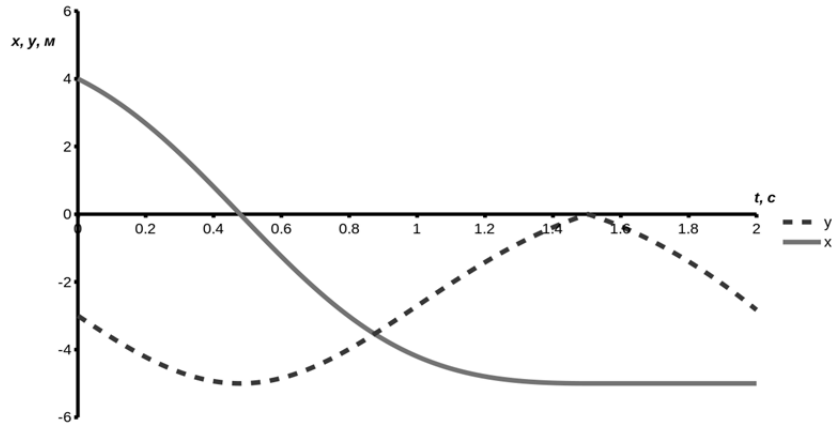


Рис. 9. Результаты расчета математического маятника с ограничением

Fig. 9. Simulation results of the simple gravity pendulum with an obstacle

Например, конструкция событийного управления в программной модели на рис. 10 не позволяет значению переменной x превысить 1.

```

1  x' = 1;
2
3  if (x > 1)
4  {
5      x(t0) = 1;
6  }
```

Рис. 10. Пример использования событийного управления

Fig. 10. Example of using event control

Также в LISMA_HDS встроена конструкция для явного задания события времени. Это может быть как единоразовое событие, так и повторяющееся заданное количество раз. Грамматика конструкции имеет вид

```
цикл_соб (C4) = "at", время, ["each", время, "repeat", (ЦБЗ | "*")], реж_тел;
```

```
время (T3) = литерал | идент;
```

Конструкция начинается с ключевого слова `at` и времени возникновения первого события. После ключевого слова `each` указывается период события. В качестве этих двух параметров могут выступать как числовые литералы, так и именованные постоянные (переменные). За ключевым словом `repeat` следует число повторений – неотрицательное целое число. Если опустить необязательную часть `each-repeat`, событие произойдет только один раз – в момент времени, указанный после `at`. `*`, `repeat` означает беско-

нечно генерируемое событие времени. Такую конструкцию удобно использовать для задания, например, генератора импульсов [16]. На рис. 11 показана программная модель с генерацией прямоугольных импульсов с периодом 2 и скважностью 2, начиная с момента времени $t = 0$.

```

1  eq: pulse = 0;
2
3  at 0 each 2 repeat *
4  {
5      eq: pulse = 1;
6  }
7
8  at 1 each 2 repeat *
9  {
10     eq: pulse = 0;
11 }

```

Рис. 11. Генерация прямоугольных импульсов с помощью конструкции at - each - repeat

Fig. 11. Generating a square wave using the at - each - repeat construct

Объявлены два бесконечно повторяющихся явных события времени. Первое событие генерируется каждые две единицы модельного времени, начиная с $t_{s1} = 0$, и начинается очередной прямоугольный импульс. Второе событие повторяется с тем же интервалом, но впервые возникает в $t_{s2} = 1$ и отвечает за окончание импульса.

4. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРАММАТИКИ

Для простоты, когда это возможно, будем считать терминальными символами нетерминальные, означающие логические и арифметические операторы, например *add_on*, а также типы событий и имена математических функций. Введем сокращенные обозначения для терминальных символов $G[\text{модель}]$ (табл. 1).

Представленная грамматика является контекстно-свободной по классификации Хомского, так как все ее продукционные правила имеют вид [11]

$$A \rightarrow \alpha, A \in V_N, \alpha \in (V_T \cup V_N)^*,$$

где V_T и V_N представляют собой терминальный и нетерминальный словари соответственно, а * означает итерацию.

Необходимым и достаточным условием принадлежности контекстно-свободной грамматики $G(V_T, V_N, P, S)$, где P – множество продукционных правил, S – начальный символ грамматики, классу LL(k) является

$$\forall A \rightarrow \beta \in P, A \rightarrow \gamma \in P (\beta \neq \gamma): \text{FIRST}(k, \beta\omega) \cap \text{FIRST}(k, \gamma\omega) = \emptyset$$

для все цепочек ω таких, что $S \Rightarrow^* \alpha A \omega$ [12].

Таблица 1

Table 1

Сокращенные наименования терминальных символов

Abbreviated notations of the terminal symbols

Терминал	Сокращение	Терминал	Сокращение	Терминал	Сокращение
"."	c1	"="	e1	идент	i1
"("	l1	")"	r1	"t0"	t0
"~="	e2	","	s1	"const"	c2
","	c3	"for"	f1	ЦБЗ	n1
вещ_число	n2	"{"	l2	"}"	r2
""	d1	"["	l3	"]"	r3
адд_оп	a1	"*"	m1	"/"	m2
"state"	m3	"delete"	d2	"macro"	m4
"from"	f2	или_оп	o1	и_оп	a2
равн_оп	o2	отн_оп	o3	не_оп	n3
тип_соб	t1	имя_мат_функ	a6	перем_инд	a5
"repeat"	a4	"if"	i2	"else"	e3
"init"	i3	"at"	a3	"each"	e4

$FIRST(k, \alpha)$, $k \in \mathbb{Z}_+$, $\alpha \in (V_T \cup V_N)^*$, представляет собой множество выводимых из α терминальных цепочек, обрезанных до k символов [10, 12].

В табл. 2 представлены множества $FIRST(1, \alpha)$ и $FIRST(2, \alpha)$ для нескольких альтернативных продукционных правил $G[\text{модель}]$ с пересекающимися $FIRST(1, \alpha)$. Совпадающие элементы множеств выделены полужирным шрифтом.

Таблица 2

Table 2

Множества $FIRST(1, \alpha)$ и $FIRST(2, \alpha)$ Sets $FIRST(1, \alpha)$ and $FIRST(2, \alpha)$

A	α	$FIRST(1, \alpha)$	$FIRST(2, \alpha)$
A4	A1	i1, a5	i1e1, a5e1
	E2	i1 , a1, n3, l1, a6, t1, a5 , n1, n2	al1, aln3, n3a1, n3n3, al1l, alil, ala5, aln1, aln2, ala6, alt1, n3l1, n3il, n3a5, n3n1, n3n2, n3a6, n3t1, l1l1, l1i1, l1a5, l1n1, l1n2, l1a6, l1t1, l1a1, l1n3, a6l1, t1l1, i1d1, a5d1, i1a1, i1m1, i1m2, i1o1, i1a2, i1o2, i1o3, a5a1, a5m1, a5m2, a5o1, a5a2, a5o2, a5o3, n1a1, n1m1, n1m2, n1o1, n1a2, n1o2, n1o3, n2a1, n2m1, n2m2, n2o1, n2a2, n2o2, n2o3
E1	i1c1E2e1E2s1	i1	i1c1
	E2e1E2s1	i1 , a1, n3, l1, a6, t1, a5, n1, n2	$FIRST(2, E2) \cup \{i1e1, a5e1, n1e1, n2e1\}$

Окончание табл. 2

End of Tab. 2

A	α	FIRST(1, α)	FIRST(2, α)
D1	C1	c2	c2i1, c2a5
	E1	i1 , a1, n3, l1, a6, t1, a5 , n1, n2	FIRST(2, i1c1E2e1E2s1) \cup FIRST(2, E2e1E2s1)
	I1	i1 , a5	i1l1, a5l1
	M2	m3	m3i1
	I2	i2	i2l1
	M3	m4	m4i1, m4a5
	C4	a3	a3i1, a3n1, a3n2
	C2	f1	f1i1

Аналогичным D1 образом строятся множества FIRST(1, α) и FIRST(2, α) для элементов тела цикла и тела режима, из которых так же выводятся цепочки E1 и I1, а поэтому пересекаются FIRST(1, α), но не пересекаются FIRST(2, α).

Таким образом, порождающая грамматика $G[\text{модель}]$ языка LISMA_HDS относится к классу LL(2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работе декларативный язык моделирования общего назначения LISMA_HDS инструментальной среды ИСМА включает возможности непосредственного или алгоритмического объявления программных постоянных, задачи Коши для неявной системы ДАУ, начальных приближений переменных, а также позволяет задавать явные события времени, режимы функционирования и переходы между ними по событиям разных типов, использовать макроподстановки и реализовывать событийное управление.

Доказано, что порождающая грамматика LISMA_HDS принадлежит к подклассу LL(2) контекстно-свободных грамматик. Для грамматик типа LL(k) возможно построение k-предсказывающего нисходящего синтаксического анализатора, выполняющего однозначный и безвозвратный разбор входной цепочки символов за линейное относительно ее длины время. Так как новая грамматика относится к тому же классу, что и грамматика другого текстового языка моделирования инструментальной среды ИСМА – LISMA_PDE, обеспечивается преемственность методов анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brenan K.E., Campbell S.L., Petzold L.R.* Numerical solution of initial-value problems in differential-algebraic equations. – PA, USA: Society for Industrial, Applied Mathematics, 1995. – 251 p.
2. *Mazzia F., Magherini C.* Test set for initial value problem solvers, release 2.4, Report 4/2008. – Bari, Italy: University of Bari, 2008. – URL: <http://pitagora.dm.uniba.it/~testset> (accessed: 09.03.2021).

3. Cellier F.E., Kofman E. Continuous system simulation. – USA: Springer, 2006. – 644 p.
4. Urquía Moreleda A., Martín Villalba C. Modeling and simulation in engineering using Modelica. – Madrid, Spain: UNED Editorial, 2018. – 298 p.
5. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учебное пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 224 с.
6. Shornikov Yu.V., Dostovalov D.N. Fundamentals of event-continuous system simulation theory. – Novosibirsk: NSTU Publ., 2018. – 175 p.
7. Esposito J.M., Kumar V., Pappas G.J. Accurate event detection for simulating hybrid systems // Proceedings of the 4th International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC '01). – Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. – P. 204–217.
8. Попов Е.А., Шорников Ю.В. Детекция событий разного типа в гибридных динамических системах // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 4 (80). – С. 159–176.
9. Fritzson P. Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 3.3: A cyber-physical approach. – Wiley-IEEE Press, 2015. – 1256 p.
10. Compilers: principles, techniques, and tools / A.V. Aho, M.S. Lam, R. Sethi, J.D. Ullman. – Pearson Education, 2007. – 1040 p.
11. Шорников Ю.В. Теория и практика языковых процессоров: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 208 с.
12. Гордеев А.В., Молчанов А.Ю. Системное программное обеспечение. – СПб.: Питер, 2001. – 736 с.
13. Бессонов А.В. Символьная спецификация и анализ программных моделей гибридных систем: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2016. – 164 с.
14. ISO/IEC 14977:1996 Information technology – Syntactic metalanguage – Extended BNFEBNF Standard. – ISO, 1996. – 12 p.
15. Томилов И.Н. Синтаксически ориентированные и графические средства описания и анализа моделей гибридных систем: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 175 с.
16. Shornikov Yu., Popov E. Modeling and simulation of electronic devices in the ISMA environment // 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). – IEEE, 2019. – P. 1–4.

Попов Евгений Александрович, ассистент кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – языки моделирования и алгоритмы численного анализа гибридных динамических систем. Имеет 30 публикаций. E-mail: e.popov@corp.nstu.ru

Шорников Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое, лингвистическое и программное обеспечение моделирования гибридных динамических систем. Имеет около 200 публикаций. E-mail: shornikov@inbox.ru

Popov Evgeny A., teaching assistant at the Automated Control Systems Department of Novosibirsk State Technical University. The main area of his research is modeling languages and simulation algorithms for hybrid dynamical systems. He has 30 publications. E-mail: e.popov@corp.nstu.ru

Shornikov Yury V., D.Sc. (Eng.), professor, professor at the Automated Control Systems Department of Novosibirsk State Technical University. The main area of his research is mathematical and linguistic software for modeling and simulation of hybrid dynamical systems. He has about 200 publications. E-mail: shornikov@inbox.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-103-122

LISMA_HDS language for modeling heterogeneous dynamic systems*E.A. POPOV^a, YU.V. SHORNIKOV^b

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

^a e.popov@corp.nstu.ru ^b shornikov@inbox.ru**Abstract**

Heterogeneous dynamic systems (HDS) simultaneously describe processes of different physical nature. Systems of this kind are typical for numerous applications. HDSs are characterized by the following features. They are often multimode or hybrid systems. In general, their modes are defined as initial value problems (Cauchy problems) for implicit differential-algebraic systems of equations. Due to the presence of heterogeneous dynamic components or processes evolving in both time and space, the dimension of the complete system of equations may be pretty high. In some cases, the system of equations has an internal structure, for instance, the differential-algebraic system of equations approximating a partial differential equation by the method of lines. An original huge system of equations can then be algorithmically rewritten in a compact form. Moreover, heterogeneous hybrid dynamical systems can generate events of qualitatively different types. Therefore one has to use different numerical event detection algorithms.

Nowadays, HDSs are modeled and simulated in computer environments. The modeling languages widely used by engineers do not allow them to fully specify all the properties of the systems of this class. For instance, they do not include event typing constructs.

That is why a declarative general-purpose modeling language named LISMA_HDS has been developed for the computer-aided modeling and ISMA simulation environment. The language takes into account all of the characteristic features of HDSs. It includes constructs for plain or algorithmic declaration of model constants, initial value problems for explicit differential-algebraic systems of equations, and initial guesses for variables. It also allows researchers to define explicit time events, modes and transitions between them upon the occurrence of events of different types, to use macros and implement event control.

LISMA_HDS is defined by a generative grammar in an extended Backus-Naur form and semantic constraints. It is proved that the grammar belongs to the LL(2) subclass of context-free grammars.

Keywords: heterogeneous dynamic systems, hybrid dynamical systems, modeling languages, event typing, formal grammars, ISMA modeling and simulation environment

REFERENCES

1. Brenan K.E., Campbell S.L., Petzold L.R. *Numerical solution of initial-value problems in differential-algebraic equations*. PA, USA, Society for Industrial, Applied Mathematics, 1995. 251 p.
2. Mazzia F., Magherini C. *Test set for initial value problem solvers, release 2.4, Report 4/2008*. Bari, Italy, University of Bari, 2008. Available at: <http://pitagora.dm.uniba.it/~testset> (accessed 09.03.2021).
3. Cellier F.E., Kofman E. *Continuous system simulation*. USA, Springer, 2006. 644 p.
4. Urquía Moreleda A., Martín Villalba C. *Modeling and simulation in engineering using Modelica*. Madrid, Spain, UNED Editorial, 2018. 298 p.

* Received 28 October 2020.

5. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy* [System modeling and simulation. Dynamical and hybrid systems]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2012. 224 p.
6. Shornikov Yu.V., Dostovalov D.N. *Fundamentals of event-continuous system simulation theory*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 175 p.
7. Esposito J.M., Kumar V., Pappas G.J. Accurate event detection for simulating hybrid systems. *Proceedings of the 4th International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC '01)*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2001, pp. 204–217.
8. Popov E.A., Shornikov Yu.V. Detektsiya sobytii raznogo tipa v gibridnykh dinamicheskikh sistemakh [Detection of different type events in hybrid dynamical systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (80), pp. 159–176.
9. Fritzson P. *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A cyber-physical approach*. Wiley-IEEE Press, 2015. 1256 p.
10. Aho A.V., Lam M.S., Sethi R., Ullman J.D. *Compilers: principles, techniques, and tools*. Pearson Education, 2007. 1040 p.
11. Shornikov Yu.V. *Teoriya i praktika yazykovykh protsessоров* [Theory and practice of language processors]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 208 p.
12. Gordeev A.V., Molchanov A.Yu. *Sistemnoe programnoe obespechenie* [System software]. St. Petersburg, Piter Publ., 2001. 736 p.
13. Bessonov A.V. *Simvol'naya spetsifikatsiya i analiz programnykh modelei gibridnykh sistem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Textual specification and analysis of hybrid system program models. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2016. 164 p.
14. *ISO/IEC 14977:1996 Information technology – Syntactic metalanguage – Extended BNFEBNF Standard*. ISO, 1996. 12 p.
15. Tomilov I.N. *Sintaksicheski orientirovannyye i graficheskie sredstva opisaniya i analiza modelei gibridnykh sistem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Syntax-oriented and visual tools for describing and analyzing hybrid system models. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2010. 175 p.
16. Shornikov Yu., Popov E. Modeling and simulation of electronic devices in the ISMA environment. *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.

Для цитирования:

Попов Е.А., Шорников Ю.В. Язык моделирования гетерогенных динамических систем LISMA_HDS // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 103–122. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-103-122.

For citation:

Popov E.A., Shornikov Yu.V. Yazyk modelirovaniya geterogennykh dinamicheskikh sistem LISMA_HDS [LISMA_HDS language for modeling heterogeneous dynamic systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 103–122. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-103-122.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,
METROLOGY AND
INFORMATION
MEASUREMENT DEVICES
AND SYSTEMS

УДК 681.2

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-123-134

Биофизическая модель процесса распознавания картин ответной реакции кожного покрова на оптическую активацию*

**С.В. БЕЛАВСКАЯ^a, И.С. ГЕВОРГЯН^b, Л.И. ЛИСИЦЫНА^c,
Л.Г. НАВРОЦКИЙ^d**

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

^a *Svetlana.belana@yandex.ru* ^b *ya.irinagevorgyan2013@yandex.ru*
^c *lisitcinali@gmail.com* ^d *leonid.navrotsky@gmail.com*

В работе представлена биофизическая модель процесса распознавания картин свечения (ответной реакции) кожного покрова в области биологически активных зон на внешнюю оптическую активацию. Модель разработана с целью увеличения эффективности процесса выявления причин различия картин свечения. Дано описание структур картин свечения, описаны их различия. Дано обоснование использования в проводимых исследованиях вынужденного излучения клеток кожного покрова (распознавание сверхслабых сигналов спонтанного излучения технически сложно). Вынужденное излучение биологических объектов появляется в результате возбуждения биологической среды внешним воздействием и оказывается значительно выше спонтанного. Спонтанное оптическое излучение клеток кожи при определенных условиях является одним из характерных свойств кожного покрова. Причиной этого излучения может быть полевая форма межклеточного взаимодействия, которая вызывает биоэмиттенцию в виде спонтанных слабых сигналов, обеспечивающих межклеточную коммуникацию. В модели использована биотехническая система, связанная с физическим состоянием человека, его характеристиками, типом меридиана и внешними условиями. Выделены подсистемы (биологическая и техническая), основные элементы системы, установлены связи между ними, необходимые и достаточные для получения выводов, сформулированы основные требования к системе, определены исходные данные. Приведены результаты первичных предварительных экспериментальных исследований с использованием разработанной модели, в которых обнаружена некоторая зависимость структур картин свечения от типа меридиана. Отмечено, что окончательные выводы о причинах различия картин свечения кожного покрова в определенных точках биологически активных зон будут сформулированы при наборе более обширной статистики с использованием разработанной модели.

* *Статья получена 02 ноября 2020 г.*

Ключевые слова: кожный покров, биологически активные зоны, внешнее оптическое воздействие, ответная реакция, различные картины свечения, причины, биофизическая модель, биотехническая система

ВВЕДЕНИЕ

В Новосибирском государственном техническом университете (НЭТИ-НГТУ) ведутся исследования процессов, протекающих в кожном покрове в области биологически активных зон (БАЗ). Одним из интересных явлений, впервые обнаруженных группой ученых не так давно, является эффект возникновения ответной реакции (свечения) определенных областей кожного покрова на предварительную засветку. Ответное свечение кожного покрова проявляется в виде картин своеобразной геометрии, присущих определенной области. Авторами данной работы впервые получено несколько структур картин свечения определенных точек биологически активных зон кожного покрова. Окончательные причины различия этих структур пока не выявлены. Возможно, они могут быть связаны с состоянием человека. Данный эффект требует глубокого изучения и теоретического обоснования.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Причины различия картин ответного свечения определенных областей кожного покрова на предварительную засветку пока не сформулированы, хотя авторами ранее была предпринята попытка проведения небольшого количества предварительных исследований по выяснению этих причин, но эта процедура оказалась довольно трудоемкой.

Для увеличения эффективности решения поставленной задачи необходимо создать биофизическую модель процесса распознавания причин различия картин ответной реакции (свечения) кожного покрова в области БАЗ на внешнюю оптическую активацию, позволяющую выявить возможную взаимосвязь структур картин свечения с физическим состоянием человека, его характеристиками, внешними условиями, типом и активностью меридиан и т. д., что является весьма актуальным, так как ответ на данный вопрос может быть полезным для оценки функционального состояния человека.

2. ТЕОРИЯ

Известно, что взаимосвязь организма человека с внешней средой устанавливается через кожный покров – оболочку тела человека, несущую информацию о его физическом и психическом состоянии. А так как аналитическая деятельность в организме свойственна не только центральной, но и периферической нервной системе и даже отдельным клеткам, то возникают механизмы проецирования рецепторной информации в наружные покровы тела, находящиеся в генетическом родстве с органами чувств и нервной системой, с ее сложной передаточной функцией. При этом в соответствующих участках тела происходит прямая и обратная передача нервных импульсов, в результате чего устанавливается оптимальная взаимосвязь организма с внешней средой [1]. Поэтому изучение параметров кожи является актуальным, так как кожный покров наиболее доступен для исследований и отражает состояние

внутренней среды организма. В настоящее время многие научные исследователи всего мира занимаются изучением параметров кожного покрова и их зависимости от внешней среды и состояния человека.

Одно из характерных свойств кожного покрова – спонтанное оптическое излучение клеток кожи при определенных условиях, причиной которого может быть полевая форма межклеточного взаимодействия, которая вызывает биохемилюминесценции в виде спонтанных сверхслабых сигналов [2]. В работе [2] анализируется полевая (нехимическая) форма межклеточного взаимодействия (межклеточная коммуникация) посредством оптического взаимодействия клеток 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. Кроме того, указано, что спонтанное излучение клеток связано с биологическими ритмами и состоянием человека. Однако исследование биофизических процессов, протекающих в кожных покровах на основе полевой коммуникации биосистем, затруднено, так как «распознавание сверхслабых сигналов биохемилюминесценции на фоне существенно более интенсивной освещенности» [2] технически сложно (спонтанное оптическое излучение определяется несколькими десятками-сотнями фотонов).

Авторами настоящей работы проводятся исследования по изучению биофизических процессов, протекающих в кожном покрове в области БАЗ, причем предложено от спонтанной биохемилюминесценции (ввиду ее малости) перейти к вынужденной флюоресценции молекул под действием импульсного оптического воздействия. Вынужденное излучение биологических объектов появляется в результате возбуждения биологической среды внешним воздействием и оказывается значительно выше спонтанного. В [3] рассматривается модель пути передачи информации при внешнем воздействии на организм от БАЗ к центральной нервной системе и обратно с учетом оптического пути передачи информации, т. е. с учетом оптического взаимодействия клеток кожи (рис. 1). Причем отмечено, что самая высокая скорость передачи информации – именно через оптический путь (миелиновые оболочки, белки, хромофоры). Кроме того, указано, что имеет место прямой и обратный процесс передачи информации, т. е. при внешнем оптическом воздействии кожный покров в области БАТ (биологически активных точек) может засветиться.

Наиболее чувствительные периферические элементы кожного покрова – определенные точки биологически активных зон (акупунктурные) [4–6]. Авторам работы [7] удалось впервые зафиксировать вынужденное свечение кожного покрова в области БАТ при внешней импульсной засветке (визуализировать БАТ), возникающее под действием происходящих биофизических процессов в кожном покрове при внешнем оптическом воздействии и одновременной фотофиксации в макрорежиме. Последующая программная обработка полученных картин вынужденных свечений на ПК в графическом редакторе с возможным оптическим увеличением изображений в среднем до четырех раз (с электронным – до 300 раз) позволила выявить их своеобразные геометрии, присущие определенным областям. Получено несколько структур картин свечения кожного покрова в области БАТ – ответной реакции на внешнюю засветку (рис. 2) [8–10].



Рис. 1. Биофизическая модель пути передачи информации от БАТ к центральной нервной системе

Fig. 1. A biophysical model of the information transmission way from the BAP to the central nervous system

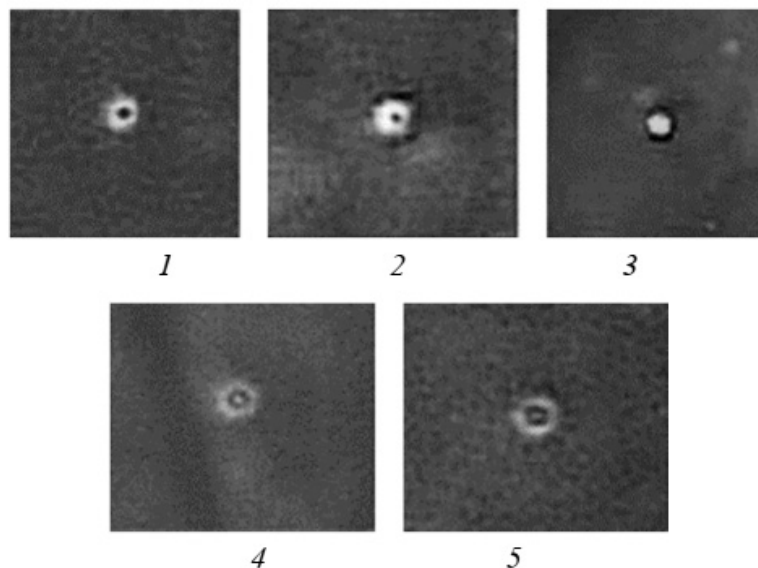


Рис. 2. Структуры картин вынужденного свечения кожного покрова биологически активных точек в области БАЗ:

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. 2. The structure of the pictures of the forced glow of the skin in the area of BAZ:

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

3. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ РАЗЛИЧИЯ СТРУКТУР КАРТИН СВЕЧЕНИЯ КОЖНОГО ПОКРОВА

На наш взгляд, может быть несколько причин различия структур картин свечения кожного покрова в области БАТ, возникающего в результате внешней засветки:

- влияние физического состояния человека;
- 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) [8, 9].

4. ПОСТРОЕНИЕ БИОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РАСПОЗНАВАНИЯ КАРТИН ОТВЕТНОЙ РЕАКЦИИ КОЖНОГО ПОКРОВА НА ОПТИЧЕСКУЮ АКТИВАЦИЮ

Для построения модели процесса выявления причин различия картин свечения (ответной реакции) кожного покрова на оптическую активацию нами была использована биотехническая система (БТС) – совокупность биологических и технических элементов, объединенных в единую функциональную систему целенаправленного поведения и связанных между собой в едином контуре управления [12, 13]. Моделирование БТС – это сложный процесс установления связей между элементами. В настоящей работе используется более глубокий и расширенный подход к составлению модели – построение биофизической модели процесса выявления причин различия структуры картин свечения (ответной реакции) кожного покрова в области БАТ на оптическую активацию.

Разрабатываемая модель предполагает наличие входных и выходных переменных, параметров, описывающих ее внутреннее состояние и поведение. В этом случае система может быть представлена в виде [13]

$$Y = F \{X, V\},$$

где Y – выходные сигналы (реакции); $F \{*\}$ – оператор функционального преобразования, определяющий поведение системы; X – входные сигналы (воздействия); V – собственные параметры.

Состояние системы определяется набором значений ее собственных параметров или производных показателей.

Первый этап моделирования – это формулировка цели (Ц) и требований к системе, разбиение модели на подсистемы (П) и элементы (Э).

Второй этап моделирования – установление варьированных данных (Д) – входных сигналов хи-критериев выбора (КВ).

В данной модели БТС предполагается разбить на 2 подсистемы.

В качестве первой подсистемы (П₁) используется кожный покров в области БАЗ определенного субъекта.

Второй подсистемой (П₂) является техническая часть, состоящая из трех блоков: блока активации (П₂₁), блока регистрации (П₂₂) выходных сигналов Y и блока обработки (БО) – оператора функционального преобразования F.

В качестве блока активации выступает источник некогерентного оптического излучения, состоящий из двух элементов варьирования: Э₁ – источника импульсного оптического излучения, Э₂ – источника постоянного оптического излучения.

В качестве блока регистрации выступает фотоприемник, а в качестве блока обработки используется персональный компьютер с программным обеспечением.

Основным требованием к системе является обеспечение возможности варьирования исходных данных (Д). Исходные данные варьируются по следующим критериям: по группам (Д₁, Д₂, ..., Д_n) и по параметрам каждой группы V (собственным параметрам). К группам можно отнести: Д₁ – характеристики субъекта, Д₂ – типы меридианов, Д₃ – активность меридиана, Д₄ – параметры внешней среды.

К параметрам первой группы Д₁ относятся характеристики субъекта: Т_{1.1} – пол, Т_{1.2} – температура кожного покрова в исследуемой области, Т_{1.3} – электрическое сопротивление кожного покрова, Т_{1.4} – частота сердечных сокращений (ЧСС), Т_{1.5} – частота дыхания, Т_{1.6} – артериальное давление, Т_{1.7} – жалобы и т. д.

Группа Д₂: Т_{2.1}, Т_{2.2}, ..., Т_{2.14} (14 известных меридианов).

Группа Д₃ (степень способности меридиана реагировать на внешнюю за-светку) состоит из двух параметров: Т_{3.1} – активный меридиан, степень активности –100 %; Т_{3.2} – неактивный меридиан.

К группе Д₄ относятся параметры внешней среды: Т_{4.1} – температура воздуха, Т_{4.2} – атмосферное давление, Т_{4.3} – влажность воздушной среды и т. д.

Биофизическая модель процесса выявления причин различия картин свечения кожного покрова в определенных точках БАЗ при внешней активации приведена на рис. 3.

Картина, зарегистрированная при определенных исходных данных, выбранных по группе и по параметру из группы, а также сами исходные данные поступают в блок обработки. Блок обработки анализирует особенности картин и отыскивает их связь с исходными данными. При наборе определенной статистики блоком обработки формируется результат (Р) – выходные сигналы Y в виде выводов о связях картин свечения с исходными данными.

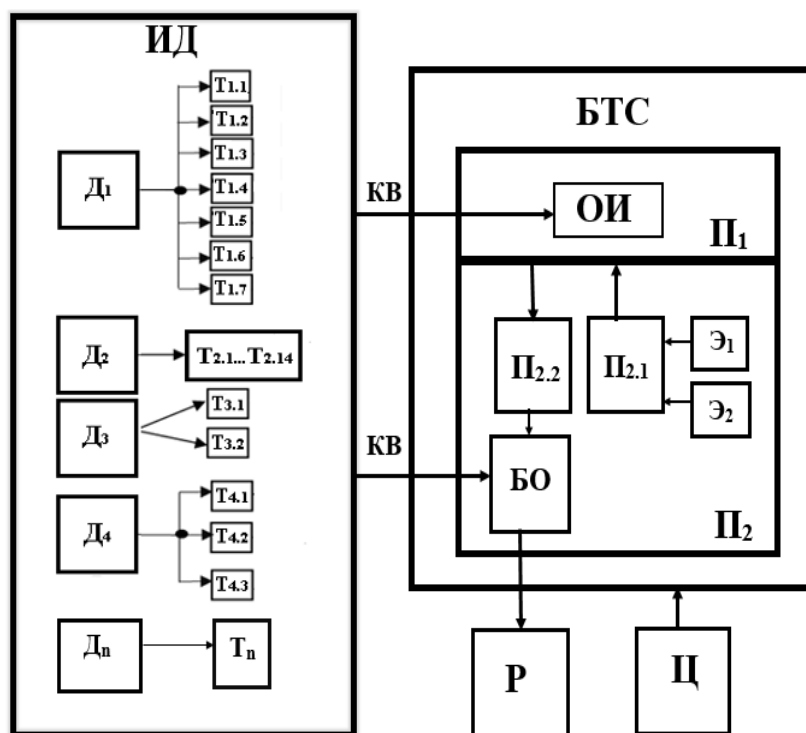


Рис. 3. Биофизическая модель процесса распознавания причин различия картин свечения кожного покрова (ответной реакции на оптическую активацию):

Ц – цель; БТС – биотехническая система; П₁ – биологическая подсистема; П₂ – техническая подсистема; ИД – исходные данные; ОИ – объект исследования; П_{2.1} – блок активации; П_{2.2} – блок регистрации; Э₁ – источник импульсного оптического излучения; Э₂ – источник постоянного оптического излучения; БО – блок обработки; Р – результат; Д₁ – характеристики субъекта; Д₂ – типы меридианов; Д₃ – активность меридиана; Д₄ – параметры внешней среды; Д_n – дополнительные данные при расширении системы; Т – параметры групп; КВ – критерии выбора

Fig. 3. A biophysical model of the process of recognizing the causes of differences in skin glow patterns (response to optical activation):

Ц – target; БТС – biotechnical system; П₁ – biological subsystem; П₂ – technical subsystem; ИД – initial data; ОИ – object of research; П_{2.1} – activation unit; П_{2.2} – registration unit; Э₁ – source of pulsed optical radiation; Э₂ – source of constant optical radiation; БО – processing unit; Р – result; Д₁ – subject's characteristics; Д₂ – types of meridians; Д₃ – meridian activity; Д₄ – environmental parameters; Д_n – additional data when expanding the system; Т – group parameters; КВ – selection criteria

Следует отметить, что основные элементы технической подсистемы Э₁, Э₂, П_{2.1}, П_{2.2}, БО в сумме представляют собой специализированную установку для исследования биофизических процессов, протекающих в кожном покрове, разработанную ранее авторами работы [8]. Для приемлемой регистрации картин свечения кожного покрова в области БАТ в установке предусмотрены возможности изменения параметров оптических импульсов возбуждения (длительности, мощности) и параметров регистрирующих процес-

сов (время выдержки, чувствительность), а также временные соотношения между возбуждающими и регистрирующими процессами. На рис. 4 представлена функциональная схема разработанной установки.



Рис. 4. Функциональная схема специализированной установки

Fig. 4. Functional scheme of a specialized unit

Установка состоит из четырех частей: узла возбуждения и регистрации свечения БАТ, контроллера управления, блока питания и управления и персонального компьютера, подробно описанных в [8].

5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ранее авторами в результате использования чернового экземпляра разработанной модели было проведено небольшое количество первичных экспериментальных исследований [8–10], которые позволили сформулировать некоторые предварительные выводы.

1. Зависимость структуры картин свечения кожного покрова от внешних условий и характеристик испытуемого пока оказалась пренебрежимо мала.

2. 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.

3. Однако ранее в работе [9] 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, зависимость типа структуры картины свечения от типа меридиана, вероятно, не является единственной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлена биофизическая модель распознавания причин различия структур картин свечения (ответной реакции) кожного покрова в определенных точках БАЗ на внешнюю оптическую активацию. Дано обоснование использования в проводимых исследованиях вынужденного излучения клеток кожного покрова (распознавание сверхслабых сигналов спонтанного излучения технически сложно). В модели использована биотехническая система БТС, связанная с физическим состоянием человека, его характеристиками, типом меридиана, внешними условиями и т. д. Выделены основные элементы системы, установлены связи между ними, необходимые и достаточные для реализации процесса выявления причин различия картин свечения при внешней засветке и определенных исходных данных, сформулированы основные требования к системе, определены исходные данные и специальные критерии выбора исходных данных. Приведены результаты первичных предварительных экспериментальных исследований с использованием разработанной модели, в которых обнаружена некоторая зависимость структур картин свечения от типа меридиан.

Окончательные причины различия этих структур пока не сформулированы. В [8–10] и в настоящей работе представлены результаты только первичных исследований в небольшом количестве.

Дальнейшая работа будет направлена на более глубокое выявление связи структуры картин свечения (ответной реакции) кожного покрова в БАТ на внешнюю активацию с различными параметрами окружающей среды, характеристиками самих испытуемых, а также активностью меридианов. Для этого необходимо продолжать исследования и набирать более обширную статистику с использованием разработанной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Портнов Ф.Г.* Электропунктурная рефлексотерапия. – 3-е изд. – Рига: Зинатне, 1987. – 352 с.
2. *Будаговский А.В., Будаговская О.Н., Будаговский И.А.* Межклеточная коммуникация посредством когерентного излучения // *Фотоника*. – 2016. – № 3 (57). – С. 148–163.
3. *Navrotsky L.G., Lisitsyna L.I.* Biophysics models 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.
4. *Самосюк И.З., Лысенюк В.П.* Акупунктура. – М.: АСТ-Пресс Книга, 2004. – 528 с. – (Медицинская энциклопедия).
5. *Кандаров Ф.Б.* Отечественная рефлексотерапия. – Уфа: Гилем, 2014. – 197 с.
6. *Колтовой Н.А.* Неэлектромагнитные поля. Психофизика. Кн. 22. Биологически активные точки, т. 5. – М., 2015. – URL: <http://docplayer.ru/27519167-Neelektromagnitnye-polyapsihofizika-kniga-22-biologicheskiiaktivnye-tochki.html> (дата обращения: 10.03.2021).
7. 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.
8. 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.

9. 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.

10. Possible reasons for differences in luminescence patterns near biologically active points / L.I. Lisitsyna, L.G. Navrotsky, A.A. Blokhin, I.S. Gevorgyan, S.V. Belavskaya, A.N. Kuzmin // The 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM-2018: proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2019. – P. 638–642.

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

12. *Корневский Н.А.* Биотехнические системы: учебник для студентов вузов по направлению «Биотехнические системы и технологии». – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 687 с.

13. *Акулов С.А., Федотов А.А.* Основы теории биотехнических систем. – М.: Физматлит, 2014. – 259 с.

Белавская Светлана Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование биофизических процессов в кожном покрове, измерительная техника. Имеет около 200 публикаций, включая 17 авторских свидетельств и патентов РФ. E-mail: Svetlana.belana@yandex.ru

Геворгян Ирина Смбаговна, магистрант кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Научные интересы – исследование биофизических процессов в кожном покрове. Имеет 7 научных публикаций. E-mail: ya.irinagevorgyan2013@yandex.ru

Лисицына Лилия Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка диагностических устройств, исследование биофизических процессов в кожном покрове. Имеет около 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, преподаватель-исследователь. Основное направление научных исследований – исследование биофизических процессов в кожном покрове. Имеет более 30 научных публикаций. E-mail: leonid.navrotsky@gmail.com

Belavskaya Svetlana V., PhD (Eng.), associate professor at the Department of Electronic Devices, Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is development of biophysical processes in skin surface and measuring equipment. She is the author of more than 200 publications including 17 RF author's certificates and patents. E-mail: BelavskayaSV@gmail.com

Gevorgyan Irina S., a Master student at the Department of Electronic Devices in Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is development of biophysical processes in the skin surface. She is the author of 7 publications. E-mail: ya.irinagevorgyan2013@yandex.ru

Lisitsyna Liliya I., D. Sc. (Eng.), professor at the Department of Electronic Devices in Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is development of diagnostic 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 G., a senior researcher at the Institute of Laser Physics SB RAS. His research interests are focused on the development of biophysical processes in the skin surface. He is the author of more than 30 publications. E-mail: leonid.navrotsky@gmail.com

A biophysical model of the recognition process of skin response patterns to optical activation*

S.V. BELAVSKAYA^a, I.S. GEVORGYAN^b, L.I. LISITSYNA^c,
L.G. NAVROTSKY^d

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

^a Svetlana.belana@yandex.ru ^b ya.irinagevorgyan2013@yandex.ru

^c lisitcinali@gmail.com ^d leonid.navrotsky@gmail.com

Abstract

This paper presents a biophysical model of the recognition process of glow patterns (response) of the skin in the area of biologically active zones to external optical activation. The model was developed to increase the efficiency of the process of identifying the causes of differences in glow patterns. The structures of glow patterns are described and their differences are described. A rationale for the use of forced radiation of skin cells in current studies is given (recognition of weak signals of spontaneous radiation is technically difficult). Forced radiation of biological objects appears as a result of excitation of the biological environment by an external action and is much higher than spontaneous radiation. Spontaneous optical radiation of skin cells under certain conditions is one of the characteristic features of the skin. This radiation can be caused by a field form of intercellular interaction, which causes biochemiluminescence in the form of spontaneous weak signals ensuring intercellular communication. The model uses a biotechnical system related to the human physical state, its characteristics, type of meridian and external conditions. We have identified subsystems (biological and technical), the main elements of the system, determined the links between them, necessary and sufficient for drawing conclusions, formulated the main requirements for the system, determined the initial data. The results of the preliminary experimental investigations with the use of the developed model are presented in which some dependence of the luminescence patterns on the meridian type is revealed. It is noted that final conclusions on the causes of skin glow patterns differences in certain points of biologically active zones will be made when more extensive statistical data is collected using the developed model.

Keywords: skin, biologically active zones, external optical effect, response, different glow patterns, causes, biophysical model, biotechnical system

REFERENCES

1. Portnov F.G. *Elektropunktturnaya refleksoterapiya* [Electropunctural reflexotherapy]. 3rd ed. Riga, Zinatne Publ., 1987. 352 p.
2. Budagovsky A.V., Budagovskaya O.N., Budagovsky I.A. Mezhekletchnaya kommunikatsiya po-sredstvom kogerentnogo izlucheniya [Intercellular communication using coherent radiation]. *Fotonika = Photonics Russia*, 2016, no. 3 (57), pp. 148–163.
3. 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.
4. Samosyuk I.Z., Lysenyuk V.P. *Akupunktura* [Acupuncture]. Moscow, AST-Press Kniga Publ., 2004. 528 p.

* Received 02 November 2020.

5. Kandarov F.B. *Otechestvennaya refleksoterapiya* [Domestic reflexology]. Ufa, Gilem Publ., 2014. 197 p.
6. Koltovoi N.A. *Neelektromagnitnye polya. Psikhofizika*. Kn. 22. *Biologicheski aktivnye točki*, t. 5 [Not electromagnetic fields. Psychophys. Bk. 22. Biologically active points. Vol. 5]. Moscow, 2015. Available at: <http://docplayer.ru/27519167-Neelektromagnitnye-polya-psihofizika-kniga22-biologicheski-aktivnye-tochki.html> (accessed 10.03.2021).
7. 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 toчек 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.
8. Lisitsina 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.
9. 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.
10. Lisitsyna L.I., Navrotsky L.G., Blokhin A.A., Gevorgyan I.S., Belavskaya S.V., Kuzmin A.N. Possible reasons for differences in luminescence patterns near biologically active points. *The 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM-2018: proceedings*, Novosibirsk, 2019, pp. 638–642.
11. 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.
12. Korenevskii N.A. *Biotekhnicheskie sistemy* [Biotechnical systems]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013. 687 p.
13. Akulov S.A., Fedotov A.A. *Osnovy teorii biotekhnicheskikh sistem* [Fundamentals of biotechnical systems theory]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014. 259 p.

Для цитирования:

Биофизическая модель процесса распознавания картин ответной реакции кожного покрова на оптическую активацию / С.В. Белавская, И.С. Геворгян, Л.И. Лисицына, Л.Г. Навроцкий // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 123–134. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-123-134.

For citation:

Belavskaya S.V., Gevorgyan I.S., Lisitsyna L.I., Navrotsky L.G. Biofizicheskaya model' protsessa raspoznavaniya kartin otvetnoi reaktsii kozhnogo pokrova na opticheskuyu aktivatsiyu [A biophysical model of the recognition process of skin response patterns to optical activation]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 123–134. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-123-134.

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). В 2021 году был переименован в «Системы анализа и обработки данных». Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Системы анализа и обработки данных» 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.

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 журнала 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 оригинала – А4. Шрифт – **Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3	верхнее поле – 4,0
правое поле – 3,3	нижнее поле – 3,9
текстовое поле 22 × 14,4	

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов, с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, межстрочный интервал с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение, Постановка задачи, Методы анализа, Основной результат, Выводы** или **Заключение**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис.* и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в описании не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку упоминания их в тексте. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0С. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha.$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул указывать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \quad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются сверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: **Файл / Параметры страницы / Разметка; установить разные четные и нечетные и первая отличается.**

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи – с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8. Номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы пустая строка размером 10. Порядковый номер – с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий; e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках.**

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК, и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте <http://journal.nstu.ru/vestnik>.