
НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1814-1196

№ 1 (70)

2018

УДК 681.51(06)
Н 76

Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Нагоряков Владимир Елиферьевич, академик, д-р техн. наук, проф., Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

Шокин Юрий Иванович, академик, д-р физ.-мат. наук, 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 техн. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Щетинин Виталий, д-р, проф., Университет Белфордшир, Великобритания

Адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, VII корп., ком. 409, 417

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

E-mail: ucit@ucit.ru

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

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

16+

УДК 681.51(06)

© Коллектив авторов, 2018

© Новосибирский государственный
технический университет, 2018

**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 1814-1196

№ 1 (70)

2018

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Барабанова Е.А. Оптическая двухкаскадная коммутационная система для обработки больших объемов данных.....	7
Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Локальный регуляризирующий алгоритм непараметрической идентификации объекта с неточным входным сигналом	19
Востриков А.С., Прохоренко Е.В., Филушов Ю.П. Многокритериальный синтез многомерного управления электроприводом переменного тока.....	39
Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Плаксиенко Е.А., Колоколова К.В. Мультиагентное управление механизмом параллельной структуры на основе декомпозирующего подхода.....	51
Гужов В.И., Сажин И.А., Шумейко В.А. Фотофиксация и регулирование переходных параметров газожидкостного потока.....	67
Григорьев Ю.Д. Системная гармония перевода поэтических текстов.....	79
Колтыгин Д.С., Седельников И.А. Методика разработки программы управления роботом для робота-манипулятора Delta	103
Малявко А.А. Функционально-императивный язык программирования E1	117
Медведев М.Ю., Кульченко А.Е., Шевченко В.А., Лазарев В.С. Многоконтурное адаптивное управление мультикоптерами.....	137
Мельников А.К. Методика расчета распределения вероятностей значений симметричных аддитивно разделяемых статистик, приближенного к их точному распределению.....	153
Фаткиева Р.Р. Моделирование автоматизированных технологических процессов в условиях информационных угроз	167

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

Пасынков Ю.А., Савиных М.А. Технологический контроль метрологических характеристик счетчиков электроэнергии на производстве	177
Правила для авторов	189

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

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

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № 77–1599 от 10 февраля 2000 г.

Журнал реферирован в ВИНТИ (<http://www.2.viniti.ru>)

Лицензия ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 20.03.2018.

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

Уч.-изд. л. 16,8. Печатных листов 12,0. Издательский № 75. Заказ № 588.

Цена договорная

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

SCIENCE BULLETIN OF THE NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISSN 1814-1196

№ 1 (70)

2018

УДК 681.51(06)
H 76

Editorial board

Chief editor

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

Deputy chief editor

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

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

Nakoryakov V. E., D. Sc. (Eng.), Institute of Thermophysics, 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 Alain, D. Sc. (Eng.), Universite de Haute Alsace, Mulhouse, France

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

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

Virolainen VeliMatti, professor, Lappeenranta Teknillinen Yliopisto, Finland

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

Voropay N. I., D. Sc. (Eng.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF

Voskoboynikov Yu. E., D. Sc. (Eng.), 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

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

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

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

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

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. (Eng.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Schetinin V., D. Sc. (Eng.), University of Bedfordshire, Luton, United Kingdom

Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
e-mail: ucit@ucit.ru

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

УДК 681.51(06)

© Authors, 2018

© Novosibirsk State Technical University, 2018

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

ISSN 1814-1196

№ 1 (70)

2018

CONTENTS

INFORMATICS COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Barabanova E.A. An optical two-stage switching system for processing large amounts of data	7
Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. A local regularizing algorithm of nonparametric identification of an inaccurate input signal object	19
Vostrikov A.S., Prokhorenko E.V., Filyushov Yu.P. Multicriteria synthesis of multidimensional control of the AC electric drive	39
Gaiduk A.P., Kapustyan S.G., Plaksienko E.A., Kolokolova K.V. Multiagent Control by Parallel Structure Mechanisms Based on the Decoupled Approach	51
Guzhov V.I., Sazhin I.A., Shumeiko V.A. Photorecording and control of transient parameters of the gas-liquid flow	67
Grogoriev Yu.D. System harmony of poetic text translation.....	79
Koltygfin D.S., Sidelnikov I.A. The methodology for developing a robot control program for the Delta robot manipulator	103
Malyavko A.A. The El functional-imperative programming language.....	117
Medvedev M.Yu., Kulchenko A.E., Shevchenko V.A., Lazarev V.S. A multiloop adaptive control for multicopters.....	137
Melnikov A.K., Мельников А.К. Processing complexity of exact probability distributions of symmetrical additively partitioned statistics and the application area of limit distributions.....	153
Fatkieva R.R. Modeling of automated technological processes under conditions of information threats.....	167

*INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASUREMENT
DEVICES AND SYSTEMS*

Pasynkov Yu.A., Savinykh M.A. Technological control of metrological characteristics of industrial electricity meters	177
Rules for authors	189

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

The journal is registered by Russian Federation Committee on the press.
The certificate on registration of mass media of PI No. 77-1599 of February 10, 2000.
Journal referenced in VINITI (<http://www.2.viniti.ru>)
License ID 04303 from 20.03.2001. Signed in print 20.03.2018. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 16,8. printed pages 12,0.
Publishing number 75. Order number 588.

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

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 621.395.74

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-7-18

Оптическая двухкаскадная коммутационная система для обработки больших объемов данных*

Е.А. БАРАБАНОВА

414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева 16, Астраханский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: elizaveta-alex@yandex.ru

Существующие оптические коммутационные системы строятся на основе ячеек 2×2 , к таким схемам можно отнести схемы Бенеша, Шпанке и Шпанке–Бенеша. Они обладают низкой масштабируемостью и при большом числе входов имеют низкую надежность и низкое быстродействие. В работе предлагается новая схема оптической двухкаскадной коммутационной системы на 256 входов и 256 выходов для волоконно-оптических систем связи. Коммутационная система является неблокируемой и полнодоступной. Принципиальным отличием предлагаемой коммутационной системы от существующих является новая схема построения, а также то, что в ее основе лежат новые оптические коммутационные ячейки, имеющие 4 входа и 4 выхода. Оптические коммутационные ячейки объединены в коммутационные блоки размерностью 16 входов и 16 выходов каждый. Проведено сравнение значений структурных характеристик существующих коммутационных схем оптических коммутаторов и предлагаемой двухкаскадной коммутационной системы. Показано, что предлагаемая схема обладает значительно меньшей сложностью и содержит значительно меньшее число каскадов, а значит, обладает более высокой надежностью и быстродействием. В предлагаемой оптической двухкаскадной системе коммутации реализуется децентрализованный способ управления, для этого предлагается использовать принцип частотного разделения управляющей и информационной волны. Для управления информационной волной в структуре коммутационной ячейки предусмотрены управляющие устройства: фильтр Брэгга, частотный детектор и формирователь управляющего сигнала. Такой способ управления позволяет повысить скорость коммутации, так как процесс управления происходит в самих коммутационных ячейках и не требует частого обращения к процессору.

Ключевые слова: оптическая коммутационная система, ячейка коммутации, коммутационный блок, каскады, фильтр Брэгга, буферное устройство, линия задержки, длина волны

ВВЕДЕНИЕ

Оптический коммутатор является одним из основных элементов полностью оптической системы связи. От быстродействия этого элемента зависит пропускная способность всей волоконно-оптической системы в целом [1].

* Статья получена 24 сентября 2017 г.

Важным требованием к построению оптических коммутаторов является обязательное свойство строгой неблокируемости, так как алгоритмы работы блокируемых схем предусматривают процесс переустановки существующих соединений, в результате чего требуется предварительная буферизация информации и усложняется процесс управления. В то же время реализация буфера в оптических коммутаторах – достаточно сложная задача. В свою очередь, неблокируемые схемы обладают существенным недостатком: для их построения требуется большое число элементов и каскадов, что влияет на надежность и быстродействие таких систем [2].

Поэтому задача разработки новых схем оптических коммутаторов, использование которых позволит повысить пропускную способность и надежность волоконно-оптической системы связи, является актуальной.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На сегодняшний день различают следующие основные схемы построения строго неблокируемых коммутационных систем: матричная схема и трехкаскадная схема Клоза [3].

Матричная схема построения оптического коммутатора является наиболее простой, но в то же время при большом числе входов сложность построения такого коммутатора значительно возрастает. Поэтому данная схема не представляется перспективной при разработке оптических коммутаторов, предназначенных для передачи больших объемов данных.

Трехкаскадная схема Клоза представляет собой архитектуру, состоящую из трех звеньев коммутационных блоков размером $n \times m$, при построении которой учитывается правило строгой неблокируемости: $m = 2n - 1$, где n – число входов в коммутационный блок входного каскада, а m – число выходов из коммутационного блока входного каскада [4]. Такая архитектура используется для построения коммутаторов с числом входов больше, чем 64, и требует меньшего числа коммутационных элементов для построения по сравнению с матричными коммутаторами. Но схема Клоза не является перспективной для построения полностью оптических коммутаторов, так как она имеет преимущества перед другими схемами при использовании коммутационных блоков на число входов и выходов более двух. В то же время размерность большинства существующих в настоящее время оптических ячеек коммутации либо ограничена двумя входами и двумя выходами, либо они работают только как вентили или имеют один вход и несколько выходов [5].

Для построения оптических коммутационных систем кроме матричных коммутаторов используются схемы, построенные на базовых элементах (БЭ) с двумя входами и двумя выходами 2×2 . К таким схемам относят схемы Бенеша, схемы Шпанке и схемы Шпанке–Бенеша [2]. Недостатком данных схем является низкая масштабируемость и большое затухание оптического сигнала, так как при увеличении числа входов возрастает число каскадов и соответственно длина соединительного пути. В противном случае такие схемы не будут являться строго неблокируемыми, и для их работы должны использоваться алгоритмы перестроения.

Можно предположить, что устранение отмеченных недостатков возможно в результате разработки принципиально новой схемы коммутационной системы.

Еще одной задачей, решаемой разработчиками коммутационных систем, является выбор системы управления.

Существующие электронные коммутационные системы используют два способа управления: децентрализованный и централизованный. Коммутационные системы, использующие первый способ управления, называют также схемами с самонастройкой. При централизованной настройке управляющая информация поступает в специальное единое для всей системы центральное устройство управления, которое вырабатывает управляющие сигналы для отдельных коммутационных элементов. В случае децентрализованной настройки каждый коммутационный элемент снабжен своим собственным локальным устройством управления, а единое центральное устройство управления отсутствует. В системе с децентрализованным управлением настроечная информация поступает на вход коммутационной системы и передается от одного коммутационного элемента к другому. Анализируя настроечную информацию, локальное устройство управления устанавливает коммутационный элемент в состояние «включено» или «выключено» [6].

Большинство существующих оптических систем коммутации используют принцип централизованного управления. При этом заголовок оптического пакета преобразуется в электрический сигнал, который поступает на устройство управления. Устройство управления, в свою очередь, обрабатывает управляющий сигнал и настраивает в соответствии с ним элементы коммутационной системы. Оценивая быстродействие коммутационной системы, учитывают скорость подачи управляющих сигналов и скорость реакции на эти сигналы. Быстродействие существующих ячеек коммутации составляет 10^{-12} с [7], а сигналы управления можно подавать со скоростью порядка 10^{-10} с [8, 9]. Следовательно, фактором, ограничивающим быстродействие оптических коммутационных систем, является частота процессора, и результирующая скорость коммутации составит 10^{-10} с.

Задачей данной работы является разработка принципиально новой неблокируемой коммутационной системы с меньшим числом каскадов. Эта задача может быть решена, если в качестве БЭ использовать коммутационную ячейку с четырьмя входами и четырьмя выходами вместо существующих 2×2 ячеек.

Кроме этого, предлагается разработка элементов оптической коммутационной системы, процесс настройки которых происходил бы за счет дополнительных управляющих элементов, размещенных внутри самих элементов. Для этого в данной работе предлагается использовать принцип частотного разделения управляющего и информационного сигналов [10].

2. СТРУКТУРА ОПТИЧЕСКОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ЯЧЕЙКИ

Принцип частотного разделения управляющего и информационного сигналов реализуется в предлагаемой оптической коммутационной ячейке на 4 входа и 4 выхода. Ячейка состоит из буферного устройства и элемента коммутации. Входной оптический сигнал, состоящий из управляющего сигнала, передаваемого на длине волны λ_c , и информационного сигнала, передаваемого на длине волны λ_i , поступает на фильтр Брэгга (ФБ) элемента коммутации. В фильтре Брэгга происходит разделение направления оптических сигналов:

управляющий сигнал поступает на частотный детектор (ЧД), а информационный сигнал поступает на отклоняющую систему (ОС). Отклоняющая система представляет собой фотонный кристалл. Принцип действия отклоняющей системы описан в работе [11]. Методика расчета коэффициентов отражения и поглощения волны в анизотропной среде рассмотрена в [12, 13]. Частотный детектор преобразует частоту управляющего сигнала в его амплитуду. При этом используется линейный участок АЧХ частотного детектора.

Амплитудно-модулированный оптический сигнал с частотного детектора поступает на формирователь оптического сигнала (ФУС), где происходит преобразование амплитуды оптической волны в управляющее напряжение. Четыре значения напряжения определяют четыре режима работы ОС, а значит, информационный сигнал может быть направлен на один из четырех выходов. Так как вход в элемент коммутации один, а число входов в саму ячейку коммутации четыре, то необходимо предусмотреть в схеме ячейки буферное устройство. Оно состоит из линий задержки (ЛЗ), по одной на каждый вход, управляемых оптическим интегральным устройством (ОИУ), включающим оптический трансформатор, мультиплексор и устройство, переключающее входы ОИУ. Каждая из четырех линий задержки подключена ко входу ОИУ. Если на один из входов оптической ячейки поступил оптический сигнал, то сигналы на трех других входах задерживаются в ЛЗ и на вход ОИУ не поступают.

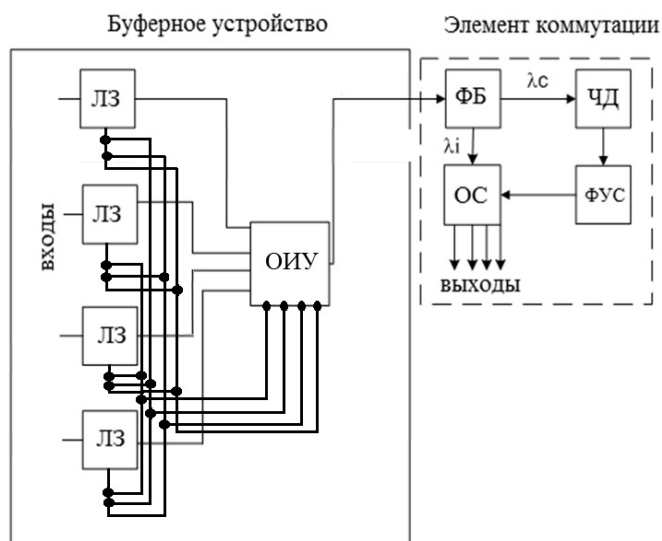


Рис.1. Структурная схема оптической ячейки коммутации

Далее сигнал поступает на вход элемента коммутации, где в зависимости от значения управляющего напряжения он будет передан на один из четырех выходов ячейки.

3. КОММУТАЦИОННЫЙ БЛОК ПЕРВОГО УРОВНЯ

На представленных оптических коммутационных ячейках 4×4 строится коммутационный блок первого уровня. Он состоит из двух каскадов входных и выходных ячеек, каждый из которых включает в себя по четыре оптических

ячейки. Схема соединения входных и выходных ячеек блока представлена на рис. 2.

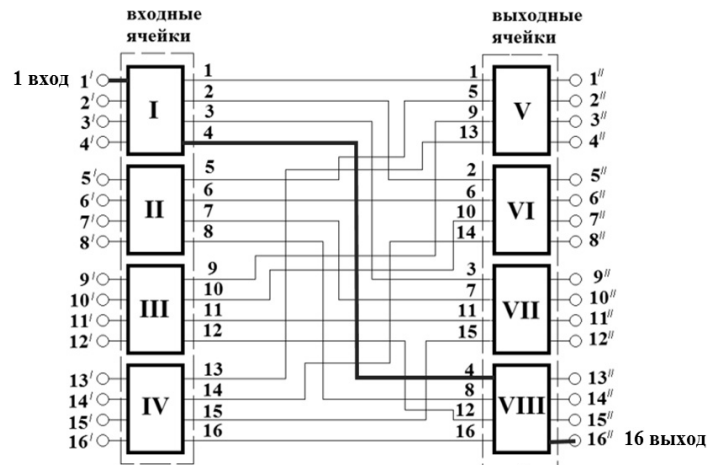


Рис. 2. Структурная схема оптического коммутационного блока первого уровня

Коммутационный блок имеет 16 входов и 16 выходов.

Схема коммутационного блока является полностью доступной. Любой вход коммутационного блока может быть соединен с любым его выходом. Для этого первый выход ячейки I входного каскада соединен с первым входом ячейки V выходного каскада; второй выход ячейки I входного каскада соединен с первым входом ячейки VI выходного каскада; третий выход ячейки I входного каскада соединен с первым входом ячейки VII выходного каскада; четвертый выход ячейки I входного каскада соединен с первым входом ячейки VIII выходного каскада. Аналогично соединены выходы остальных ячеек с II по IV входного каскада со входами ячеек V–VIII выходного каскада.

Например, при необходимости передать сигнал с первого входа коммутационного блока на 16-й выход, сигнал с первого входа коммутационной ячейки I поступит на четвертый ее выход, затем будет передан на первый вход коммутационной ячейки VIII и далее – на четвертый выход этой ячейки, который одновременно является 16-м выходом коммутационного блока.

4. ОПТИЧЕСКАЯ КОММУТАЦИОННАЯ СИСТЕМА НА 256 ВХОДОВ И 256 ВЫХОДОВ

Оптическая коммутационная система на 256 входов и 256 выходов состоит из входного и выходного каскадов (рис. 3 и 4), собранных на коммутационных блоках первого уровня (I, II, III, IV), представленных выше. Коммутационные блоки первого уровня каждого каскада объединены в коммутационные блоки второго уровня и обозначаются A, B, C, D. Каждый из коммутационных блоков второго уровня состоит из четырех коммутационных блоков первого уровня. Каждый из коммутационных блоков второго уровня имеет 64 входа и 64 выхода.

На схеме соединений (рис. 3 и 4) указаны входы коммутационной системы, выходы коммутационной системы и межкаскадные соединения.

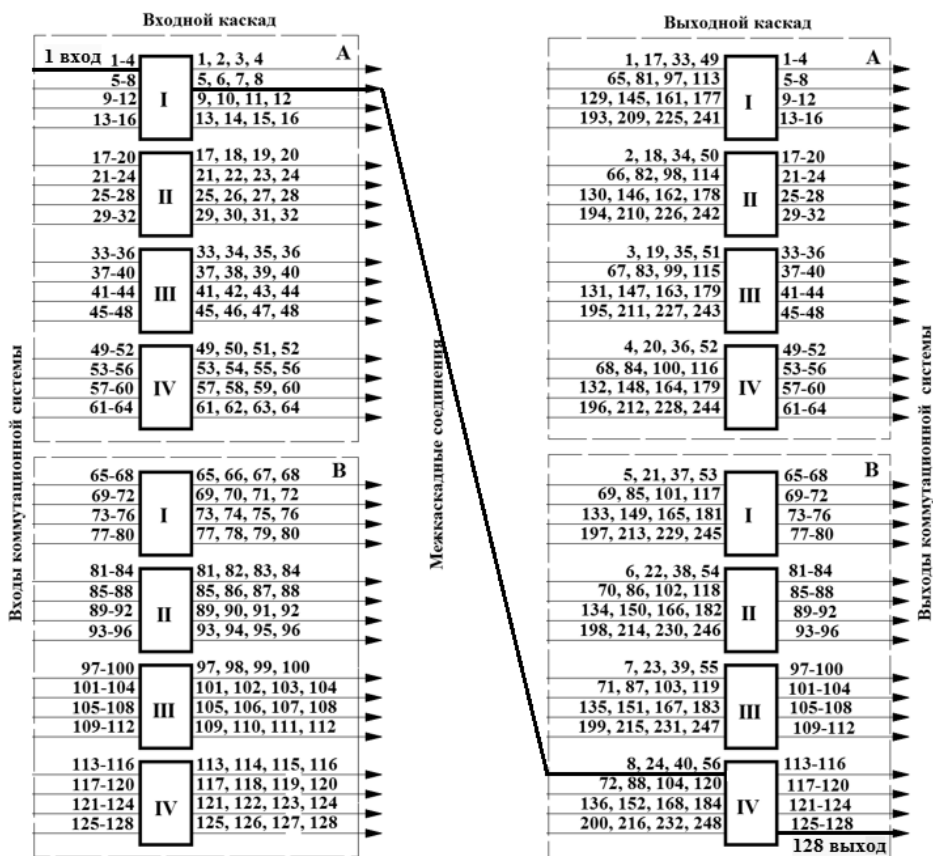


Рис. 3. Коммутационная система (с 1-го по 128-й вход)

Оптическая коммутационная система является симметричной: число входов коммутационной системы равно числу выходов.

Важным свойством оптической коммутационной системы является ее неблокируемость. Система является строго неблокируемой. Это означает, что очередной оптический сигнал может быть передан от заданного входа к заданному незанятому выходу независимо от того, какие соединения установлены к данному моменту времени без их перестроения.

Оптическая коммутационная система является полностью доступной, т. е. любой вход коммутационной системы может быть соединен с любым ее выходом. Для этого первый выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока I выходного каскада группы A; второй выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока II выходного каскада группы A; третий выход коммутационного I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока III выходного каскада группы A; четвертый выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока IV выходного каскада группы A.

Пятый выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с первым входом коммутационного блока I выходного каскада группы B; шестой выход коммутационного блока I входного каскада группы A соединен с

первым входом коммутационного блока II выходного каскада группы В; седьмой выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока III выходного каскада группы В; восьмой выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока IV выходного каскада группы В.

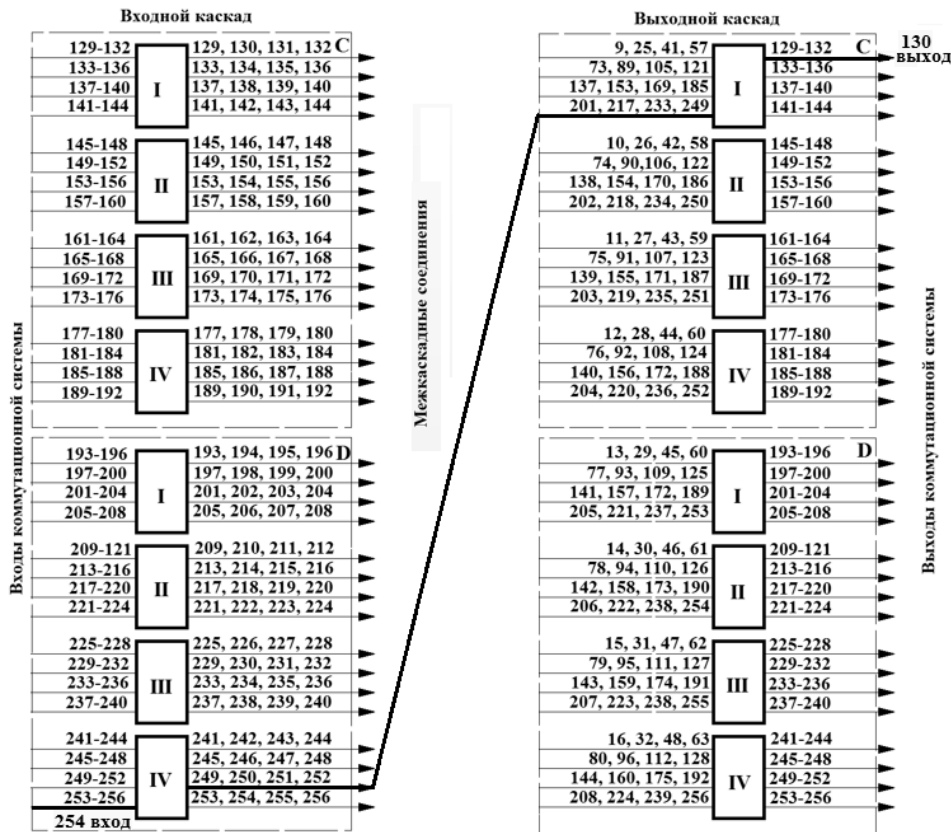


Рис. 4. Коммутационная система (с 129-го по 256-й вход)

Девятый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока I выходного каскада группы С; десятый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока II выходного каскада группы С; одиннадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока III выходного каскада группы С; двенадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока IV выходного каскада группы С.

Тринадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока I выходного каскада группы D; четырнадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока II выходного каскада группы D; пятнадцатый выход коммутационного блока I входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока III выходного каскада группы D; шестнадцатый выход коммутационного блока I

входного каскада группы А соединен с первым входом коммутационного блока IV выходного каскада группы D.

Аналогично соединены выходы остальных коммутационных блоков с II по IV входного каскада группы А, а также выходы коммутационных блоков I–IV входного каскада групп В–D со входами коммутационных блоков с I по IV выходного каскада групп А–D.

Таким образом, при необходимости передать сигнал с первого входа на 128-й выход коммутационной системы вначале сигнал будет передан на восьмой выход коммутационного блока I группы А второго уровня входного каскада; далее сигнал будет передан на первый вход коммутационного блока IV группы В второго уровня выходного каскада, а с первого входа – на 16-й выход данного коммутационного блока, который, в свою очередь, является 128-м выходом коммутационной системы. Аналогично на рис. 4 показан путь прохождения оптического сигнала с 254-го входа на 130-й вход.

Настройка оптической коммутационной системы происходит за два такта. За первый такт происходит процесс коммутации в ячейках входного каскада, за второй такт происходит процесс коммутации оптического сигнала в ячейках выходного каскада.

К основным структурным характеристикам, по которым можно произвести сравнение предлагаемой оптической коммутационной системы и существующих схем коммутации, относятся количество БЭ в коммутационной схеме и число каскадов системы, которое определяет максимальную длину соединительного пути и влияет на скорость коммутации и вероятность блокировки [14].

На основе метода математической индукции получены выражения для нахождения количества БЭ, требуемых для построения предлагаемой оптической системы, а также количества каскадов в коммутационной схеме в зависимости от числа входов.

В таблице представлены структурные характеристики коммутационных схем Бенеша, Шпанке, Шпанке–Бенеша [15] и предлагаемой двухкаскадной схемы.

Структурные характеристики коммутационных схем оптических коммутаторов

Наименование коммутационной схемы	Наименование структурной характеристики	
	Количество БЭ M	Количество каскадов R в коммутационной схеме
Схема Бенеша	$N(2 \log_2 N - 1) / 2$	$2 \log_2 N - 1$
Схема Шпанке	$2N(N - 1)$	$2 \log_2 N$
Схема Шпанке–Бенеша	$N(N - 1) / 2$	N
Схема двухкаскадная	$N / 2$ (при $N \leq 16$), N (при $N > 16$)	$\frac{\log_2 N}{2}$ (при $N \leq 16$), N (при $N > 16$)

На рис. 5 представлены зависимости числа базовых элементов для типовых схем оптических коммутаторов и предлагаемой схемы. На рис. 6 показана зависимость числа каскадов в типовых коммутационных системах и в разработанной системе.

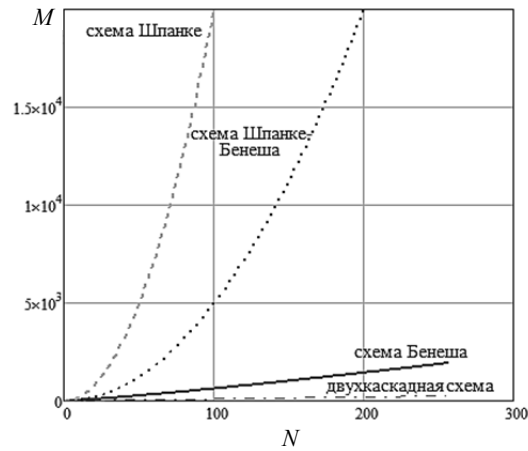


Рис. 5. Зависимости числа базовых элементов M в коммутационных схемах от числа входов N

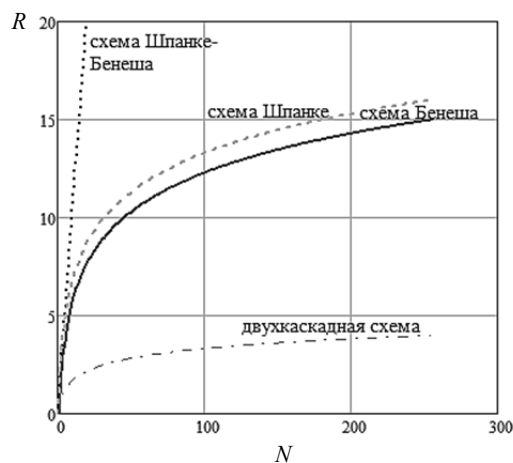


Рис. 6. Зависимости числа каскадов R в коммутационных схемах от числа входов N

Представленные зависимости дают основание сделать следующие выводы:

- число БЭ, требуемых для построения предлагаемой двухкаскадной коммутационной схемы, значительно меньше числа БЭ, требуемых для построения существующих схем; в частности, при числе входов, равном 256, сложность предлагаемой двухкаскадной схемы будет в 7,5 раза меньше сложности схемы Бенеша, в 510 раз меньше сложности схемы Шпанке и в 128 раз меньше сложности схемы Шпанке–Бенеша;

- количество каскадов в предлагаемой коммутационной системе значительно меньше числа каскадов существующих схем коммутации; в частности, при числе входов, равном 256, число каскадов предлагаемой схемы будет в 4 раза меньше числа каскадов схемы Бенеша и схемы Шпанке и в 64 раза меньше числа каскадов схемы Шпанке–Бенеша.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый тип оптической двухкаскадной коммутационной системы с 256 входами и 256 выходами. Система подразделяется на 4 коммутационных блока второго уровня, каждый из которых включает 4 блока первого уровня. Блоки первого уровня строятся на принципиально новом виде коммутационных ячеек с четырьмя входами и четырьмя выходами.

В работе описан принцип действия коммутационной системы в целом, а также блоков первого и второго уровня. Структура и принцип действия предлагаемой базовой коммутационной ячейки является также предметом данной статьи.

В работе проведен сравнительный анализ предложенной коммутационной системы с уже существующими. В результате показано, что для ее построения требуется значительно меньшее число базовых элементов, что позволит снизить стоимость и повысить надежность описанной системы. Более того, число каскадов предложенной автором системы в 4 раза меньше числа каскадов существующих схем коммутации, что позволит уменьшить вероятность блокировок и повысить ее быстродействие.

Кроме этого, особенностью предлагаемой двухкаскадной коммутационной системы является новый способ управления, заключающийся в размещении управляющих устройств в самих коммутационных элементах и частотном разделении управляющего и информационного сигналов. Данный способ управления не требует обращения к центральному процессору и позволит повысить быстродействие коммутационной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Парыгин Д.С.* Модель интеркоммуникационной системы обеспечения потребностей жителей города // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – Т 17, № 14 (117). – С. 90–95.
2. *El-Bawab T.S.* Optical switching. – New York: Springer Science and Business Media, 2006. – 451 p.
3. *Гайворонская Г.С., Рябцов А.В.* Особенности применения оптических коммутаторов в современных информационных сетях // Applicable Information models. – Sofia: ITHEA, 2011. – С. 169–181.
4. *Hwang F.K.* A survey of nonblocking multicast three-stage clos networks // IEEE Communications Magazine. – 2003. – Vol. 41 (10). – P. 34–37.
5. *Riza N.A., Madamopoulos N.* Compact switched-retroreflection-based 2x2 optical switching fabric for WDM applications // Journal of Lightwave Technology. – 2005. – Vol. 23, iss. 1. – P. 247–260.
6. *Барабанова Е.А., Береснев И.А., Барабанов И.О.* Управление элементами коммутации в оптической системе с параллельным поиском каналов связи // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 1. – С. 89–97.
7. 160-Gb/s Silicon All-Optical Packet Switch for Buffer-less Optical Burst Switching / H. Hu, H. Ji, M. Pu, M. Galili, K. Yvind K., L.K. Oxenløwe // Journal of Lightwave Technology. – 2015. – Vol. 33, iss. 4. – P. 843–848.
8. Reconfigurable multipipeline computing structures / I.A. Kaliaev, I.I. Levin, E.A. Semernikov, V.I. Shmoilov. – Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, 2012. – 340 p.
9. The design of an electro-optic control circuit for photonic packet switching applications / J.S. Van der Merwe, R. Geldenhuys, K. Thakulsukanant, Z. Wang, N. Chi, S. Yu // AFRICON 2007, IEEE, September 26–28, 2007. – Windhoek, Namibia, 2007. – P. 1–6.
10. *Barabanov I.O., Maltseva N.S., Barabanova E.A.* Switching cell for information transmission optical systems // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2016. – Saratov, 2016. – P. 343–347.

11. Фотонная коммутационная ячейка: патент на полезную модель / Е.А. Барабанова, К.В. Выговтов, Н.С. Мальцева, И.О. Барабанов. – № 2017128161/28; заявл. 07.08.2017.

12. *Выговтов К.А.* Эффект втягивания электромагнитной волны одноосной анизотропной средой с магнитной анизотропией // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2017. – № 2. – С. 33–39.

13. *Выговтов К., Belimenko O.* Angle dependance reflection properties of stratified anisotropic structure with arbitrary anisotropy axis orientation // Proceedings of the 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET 2014. – Dnipropetrovsk, Ukraine, 2014. – P. 61–64.

14. *Руденко Д.В.* Структурные характеристики оптических коммутаторов // Мир транспорта. – 2012. – № 4. – С. 124–129.

15. *Esmael Zeinali K.H., Fesharaki M.N.* NMR: a new approach for optimal design of strictly non-blocking multistage interconnection networks // Journal of Applied Sciences. – 2008. – Vol. 8 (19). – P. 3453–3459.

Барабанова Елизавета Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – методы построения оптических коммутационных систем. Имеет более 50 публикаций, в том числе 2 монографии и 4 патента. E-mail: elizavetaalex@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-7-18

An optical two-stage switching system for processing large amounts of data*

*E.A. BARABANOVA*¹

Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, PhD (Eng.). E-mail: elizavetaalex@yandex.ru

The existing optical switching systems are built on the basis of 2x2 cells. Such schemes include the Benes, Shpanke and Shpanke-Benes schemes. They have low scalability and a large number of inputs and are characterized by low reliability and low performance. A new scheme of an optical two-stage switching system with 256 inputs and 256 outputs for fiber-optic communication systems is proposed. The switching system is non-blocking and fully accessible. The principal difference between the proposed switching system and the existing ones is its new construction scheme, as well as the fact that it is based on new optical switching cells having 4 inputs and 4 outputs. The optical switching cells are combined into 16-input and 16 output switching blocks. A comparison was made between the values of structural characteristics of the existing switching circuits of optical switches and the proposed two-stage switching system. It is shown that the proposed scheme is much less complex and contains a much smaller number of cascades, and thus has a higher reliability and speed. In the proposed optical two-stage switching system, a decentralized control method is realized. For this purpose it is proposed to use the principle of frequency separation of the control and information wave. To control an information wave in the structure of the switching cell, control devices are provided, namely a Bragg filter, a frequency detector, and a driver for the control signal. This control method allows increasing the switching speed since the control process takes place in the switching cells themselves and does not require frequent access to the processor.

Keywords: optical switching system, switching cell, switching unit, cascades, Bragg filter, buffer device, delay line, wavelength

* Received 24 September 2018.

REFERENCES

1. Parygin D.S. Model' interkommunikatsionnoi sistemy obespecheniya potrebnosti zhitel'ei goroda [Model intercommunication system of ensuring needs of city inhabitants]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2013, vol. 17, no. 14 (117), pp. 90–95.
2. El-Bawab T.S. *Optical switching*. New York, Springer Science and Business Media, 2006. 451 p.
3. Gaivoronskaya G.C., Ryabtsov A.V. [Features of the use of optical switches in modern information networks]. *Applicable Information Models*. Sofia, ITHEA, 2011, pp. 169–181. (In Russian).
4. Hwang F.K. A survey of nonblocking multicast three-stage cros networks. *IEEE Communications Magazine*, 2003, vol. 41 (10), pp. 34–37.
5. Riza N.A., Madamopoulos N. Compact switched-retroreflection-based 2x2 optical switching fabric for WDM applications. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, vol. 23, iss. 1, pp. 247–260.
6. Barabanova E.A., Beresnev I.A., Barabanov I.O. Upravlenie elementami kommutatsii v opticheskoj sisteme s parallel'nym poiskom kanalov svyazi [Control of switching elements in an optical system with parallel search for communication channels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2017, no. 1, pp. 89–97.
7. Hu H., Ji H., Pu M., Galili M., Yvind K., Oxenløwe L.K. 160-Gb/s Silicon All-Optical Packet Switch for Buffer-less Optical Burst Switching. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, vol. 33, iss. 4, pp. 843–848.
8. Kaliaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Shmoilov V.I. *Reconfigurable multipipeline computing structures*. Hauppauge, NY, Nova Science Publishers, 2012. 340 p.
9. Merwe J.S. van der, Geldenhuys R., Thakulsukanant K., Wang Z., Chi N., Yu S. The design of an electro-optic control circuit for photonic packet switching applications. *AFRICON 2007*, IEEE, September 26–28, 2007, Windhoek, Namibia, pp. 1–6.
10. Barabanov I.O., Maltseva N.S., Barabanova E.A. Switching cell for information transmission optical systems. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2016*. Saratov, 2016, pp. 343–347.
11. Barabanova E.A., Vytovtov K.V., Mal'tseva N.S., Barabanov I.O. *Fotonnaya kommutatsionnaya yacheika: patent na poleznyuyu model'*. Application, no. 2017128161/28, 2017.
12. Vytovtov K.A. Effekt vtvagivaniya elektromagnitnoi volny odnoosnoi anizotropnoi sredoi s magnitnoi anizotropiey [Penetration effect of an uniaxial anisotropic medium with magnetic anisotropy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika – Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2017, no. 2, pp. 33–39.
13. Vytovtov K., Belimenko O. Angle dependance reflection properties of stratified anisotropic structure with arbitrary anisotropy axis orientation. *Proceedings of the 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET 2014*, Dnipropetrovsk, Ukraine, 2014, pp. 61–64.
14. Rudenko D.V. Strukturnye kharakteristiki opticheskikh kommutatorov [Structural characteristics of optical switches]. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2012, no. 4, pp. 124–129.
15. Esmaeel Zeinali K.H., Fesharaki M.N. NMR: a new approach for optimal design of strictly non-blocking multistage interconnection networks. *Journal of Applied Sciences*, 2008, vol. 8 (19), pp. 3453–3459.

Для цитирования:

Баранова Е.А. Оптическая двухкаскадная коммутационная система для обработки больших объемов данных // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 7–18. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-7-18.

For citation:

Barabanova E.A. Opticheskaya dvukhkaskadnaya kommutatsionnaya sistema dlya obrabotki bol'shikh ob'emov dannykh [An optical two-stage switching system for processing large amounts of data]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 7–18. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-7-18.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.51:519.6

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-19-38

Локальный регуляризирующий алгоритм непараметрической идентификации объекта с неточным входным сигналом*

Ю.Е. ВОСКОВОЙНИКОВ^{1,2}, Д.А. КРЫСОВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: voscob@mail.ru

² 630008, РФ, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: voscob@mail.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: Tomahawk.RUS@gmail.com

В качестве модели стационарной динамической системы часто выступает интегральное уравнение Вольтера первого рода с разностным ядром. Для такой модели задача непараметрической идентификации заключается в оценивании этого разностного ядра (называемого импульсной переходной функцией) по измеренным значениям входного и выходного сигналов идентифицируемой динамической системы [1]. Как известно, эта задача является некорректно поставленной, т. е. решение может не существовать, быть не единственным и обладать неустойчивостью по отношению к погрешностям (шумам измерения) исходных данных. Для получения единственного устойчивого (но приближенного) решения используются различные методы регуляризации, в частности метод регуляризации А.Н. Тихонова [2, 3]. При этом вычислительной основой алгоритмов, реализующих эти методы, является дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [4, 5]. Характерной чертой этих алгоритмов является то, что коэффициенты ДПФ регуляризованного решения зависят от одного параметра, называемого параметром регуляризации. Выбором этого параметра достигается приемлемая точность регуляризованного решения и его сходимости. При этом (применительно к рассматриваемой задаче идентификации) предполагают, что входной сигнал (ядро интегрального уравнения) задан точно, а выходной сигнал системы регистрируется с некоторой случайной ошибкой. Однако такое предположение редко выполняется на практике, так как и входной и выходной сигналы системы измеряются и регистрируются приборами примерно одинакового класса точности и, следовательно, и входной и выходной сигналы задаются с случайными погрешностями – шумами измерений. В работах автора (например, [5, 6]) для случая, когда эти шумы некоррелированы, был предложен регуляризирующий алгоритм, который учитывал эти шумы как при построении устойчивого решения, так и при оценивании оптимального параметра регуляризации. Од-

* Статья получена 12 сентября 2017 г.

нако, наличие только одного «управляющего» параметра – параметра регуляризации – не позволяет подобрать для каждого коэффициента ДПФ решения свой регуляризирующий множитель, минимизирующий ошибку вычисления этого коэффициента и всего регуляризованного решения в целом. Поэтому в данной работе предлагается подход к нахождению для каждого коэффициента ДПФ регуляризованного решения своего квазиоптимального регуляризирующего множителя из условия минимума среднеквадратической ошибки идентификации. Построена итерационная процедура уточнения отношения «шум/сигнал», входящего в регуляризирующий множитель, и находятся предельные точки этой процедуры. Выполненный вычислительный эксперимент показал более высокую точность идентификации предложенным локальным регуляризирующим алгоритмом по сравнению с регуляризирующим алгоритмом, зависящим от одного параметра регуляризации.

Ключевые слова: задача непараметрической идентификации, оптимальный регуляризирующий алгоритм, некорректно поставленные задачи, интегральное уравнение Вольтера I рода, локальный регуляризирующий алгоритм идентификации, ошибки регуляризованного решения задачи идентификации, итерационная процедура уточнения локального отношения «шум/сигнал», сходимость регуляризованного решения задачи идентификации, эффективность локального регуляризирующего алгоритма идентификации

1. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее часто в качестве математической модели стационарной динамической системы используется интегральное уравнение Вольтера I рода с разностным ядром [1]:

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

где $k(\tau)$ – импульсная переходная функция (ИПФ) динамической системы (ядро интегрального уравнения (1)); $\varphi(\tau)$ и $f(t)$ – входной и выходной сигналы системы. С уравнением (1) связаны две задачи:

- *обратная измерительная задача*, когда необходимо построить оценку для входного сигнала $\varphi(\tau)$ по зарегистрированным значениям функций $k(\tau)$ и $f(t)$, т. е. решить уравнение (1) относительно функции $\varphi(\tau)$;
- *задача непараметрической идентификации*, где необходимо построить оценку для ИПФ системы по зарегистрированным значениям функций $\varphi(\tau)$ и $f(t)$. Для этой задачи уравнение (1) целесообразно переписать в «симметричном» виде:

$$\int_0^t \varphi(t-\tau')k(\tau')d\tau' = f(t). \quad (2)$$

Заметим, что как первая, так и вторая задачи относятся к классу некорректно поставленных задач, когда могут нарушаться условия корректности по Адамару, в частности, появляется неустойчивость решения интегрального уравнения к погрешностям задания правой части $f(t)$ уравнений (1) и (2) [2, 3].

Для нахождения единственного и устойчивого (но приближенного) решения обратной измерительной задачи (т. е. решения уравнения (1) относительно функции $\varphi(\tau)$) используют различные методы регуляризации – как детерминированные, так и статистические [3–5]. Разностное ядро (т. е. когда $k(t-\tau)$ зависит только от разности $(t-\tau)$ и не зависит от t) интегрального уравнения (1) позволяет в качестве вычислительной базы построения регуляризованного решения использовать дискретное преобразование Фурье (ДПФ), что обуславливает (совместно с алгоритмом быстрого преобразования Фурье) высокую эффективность регуляризирующих алгоритмов (подробнее см.: [4, 5]). При этом, как правило, предполагают, что правая часть известна с некоторой погрешностью, а ядро $k(\tau)$ уравнения (1) задано точно. Эти же методы можно использовать и для решения задачи непараметрической идентификации [7], и тогда ядром уравнения (2) будет уже входной сигнал системы $\varphi(\tau)$. В этом случае делается аналогичное предположение, что входной сигнал идентифицируемой системы задан точно. Однако такое требование редко выполняется на практике, так как и входной и выходной сигналы системы измеряются и регистрируются приборами примерно одинакового класса точности и, следовательно, входной и выходной сигналы задаются с случайными погрешностями – шумами измерений.

В работах [5, 6] для обратной измерительной задачи предполагалось, что измеренные значения правой части и ядра интегрального уравнения (1) измерены с аддитивными случайными погрешностями, которые не коррелированы друг с другом. При этих предположениях был построен оригинальный регуляризирующий алгоритм (также использующий дискретное преобразование Фурье), который учитывает погрешности задания ядра уравнения не только при построении регуляризованного решения, но и при оценивании оптимального параметра регуляризации, минимизирующего СКО регуляризованного решения.

Существенной чертой этих регуляризирующих алгоритмов является наличие одного «управляющего» параметра – параметра регуляризации – для всех коэффициентов ДПФ регуляризованного решения, и это позволяет назвать (в соответствии с установившейся терминологией [8]) такие регуляризирующие алгоритмы «глобальными» в пространстве коэффициентов ДПФ (т. е. в частотной области). Подбором параметра регуляризации можно получить регуляризованное решение с минимальной ошибкой. Однако нахождение такого оптимального параметра регуляризации на практике представляет известную проблему. В литературе предложен ряд алгоритмов, позволяющих более или менее успешно оценить оптимальный параметр регуляризации, используя для этого как детерминированные, так и статистические подходы (подробнее см.: [5, 9–13]).

К сожалению, наличие только одного параметра регуляризации не позволяет подобрать для каждого вычисляемого коэффициента регуляризованного решения свой регуляризирующий множитель, минимизирующий как ошибку вычисления этого коэффициента, так и ошибку всего регуляризованного решения. Такой подбор позволил бы уменьшить общую ошибку

регуляризованного решения по сравнению с глобальными алгоритмами, а сам регуляризирующий алгоритм можно назвать локальным в частотной области.

В работе [14] для решения обратной измерительной задачи был предложен подход к построению локального регуляризирующего алгоритма при точно заданном ядре интегрального уравнения (1). Доказана сходимость регуляризованного решения к нормальному псевдорешению при стремлении уровня погрешности правой части к нулю. Проведено сравнение по точности с глобальными регуляризирующими алгоритмами. Для задачи непараметрической идентификации этот подход был применен в работе [7].

В данной работе предлагается локальный регуляризирующий алгоритм непараметрической идентификации (т. е. решение уравнения (2)) при неточно заданных входном и выходном сигналах идентифицируемой системы. При этом решаются следующие задачи:

- построение локального оптимального регуляризирующего алгоритма, минимизирующего среднеквадратическую ошибку регуляризованного решения;
- построение итерационного алгоритма апостериорного уточнения отношения «шум/сигнал выхода», от которого зависит локальный регуляризирующий множитель;
- доказательство сходимости построенного регуляризованного решения;
- исследование эффективности построенного локального регуляризирующего алгоритма.

2. ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯРИЗИРУЮЩИЙ АЛГОРИТМ

В данной работе задача непараметрической идентификации рассматривается при предположении, что выходной и входной сигналы динамической системы (уравнение (2)) измерены (заданы) в дискретные моменты времени со случайными погрешностями (шумами):

$$\tilde{f}(t_i) = f(t_i) + \eta(t_i); \quad \tilde{\varphi}(\tau_j) = k(\tau_j) + \zeta(\tau_j),$$

где $\eta(t_i)$, $\zeta(\tau_j)$ – случайные величины с нулевыми средними и дисперсиями σ_η^2 , σ_ζ^2 соответственно, не коррелированные друг с другом. Шаг дискретизации по аргументам t и τ одинаков и равен Δ_t .

Построение регуляризованного решения можно представить следующими «укрупненными» шагами (подробнее см.: [5]):

Шаг 1. Формирование по дискретным значениям $\tilde{f}_i = \tilde{f}(t_i)$, $\tilde{\varphi}_j = \tilde{\varphi}(\tau_j)$ периодических последовательностей $\{\tilde{f}_p(i)\}$, $\{\tilde{\varphi}_p(i)\}$, $i = 0, \dots, N-1$, где N – величина периода и взятия от этих последовательностей ДПФ, т. е. вычисление коэффициентов ДПФ $\tilde{F}_p(l)$, $\tilde{\Phi}_p(l)$, $l = 0, \dots, N-1$. Формиро-

вание периодических последовательностей осуществляется следующим образом:

$$\tilde{f}_p(i) = \begin{cases} \tilde{f}_i, & \text{если } 0 \leq i \leq N_f - 1, \\ 0, & \text{если } N_f \leq i \leq N - 1; \end{cases} \quad \tilde{\Phi}_p(i) = \begin{cases} \tilde{\Phi}_i \Delta_t N, & \text{если } 0 \leq i \leq N_\Phi - 1, \\ 0, & \text{если } N_\Phi \leq i \leq N - 1. \end{cases}$$

Используемое ДПФ определяется следующими соотношениями:

- прямое ДПФ:

$$F_p(l) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f_p(j) \exp\left(-\frac{2\pi i}{N} l j\right);$$

- обратное ДПФ:

$$f_p(j) = \sum_{l=0}^{N-1} F_p(l) \exp\left(\frac{2\pi i}{N} l j\right).$$

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

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

Очевидно, что точность регуляризованного решения определяется способом вычисления коэффициентов $K_{p\alpha}(l)$ на втором шаге, которые будем находить в виде

$$K_{pq}(l) = \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + q_p(l)} \tilde{F}_p(l), \quad l = 0, \dots, N - 1, \quad (3)$$

где $q_p(l)$ – стабилизирующий член, определяемый ниже. Обозначим коэффициенты ДПФ точного решения как $\bar{K}_p(l)$, и ошибку оценивания коэффициента $\bar{K}_p(l)$ определим условным математическим ожиданием

$$\Delta_{pq}(l) = M \left[|K_{pq}(l) - \bar{K}_p(l)|^2 / \tilde{\Phi}_p(l) \right] \quad (4)$$

при заданном коэффициенте ДПФ $\tilde{\Phi}_p(l)$ входного сигнала идентифицируемой системы. Справедливо

Утверждение 1. Если случайные величины $\eta(t_i)$, $\zeta(\tau_j)$ не коррелированы между собой и отсутствует корреляция в соседние моменты времени, то

$$\Delta_{pq}(l) = \frac{\left[\sigma_{Z_p}^2 |\bar{K}_p(l)|^2 + \sigma_{H_p}^2 \right] |\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + q_p^2(l) |\bar{K}_p(l)|^2}{\left[|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + q_p(l) \right]^2}, \quad (5)$$

где $\sigma_{Z_p}^2$ и $\sigma_{H_p}^2$ – дисперсии коэффициентов ДПФ периодических последовательностей $\{\zeta_p(i)\}$ и $\{\eta_p(i)\}$, которые зависят от дисперсий σ_ζ^2 и σ_η^2 следующим образом [5]:

$$\sigma_{Z_p}^2 = \frac{N_\varphi}{N^2} \sigma_\zeta^2, \quad \sigma_{H_p}^2 = \frac{N_f}{N^2} \sigma_\eta^2, \quad (6)$$

где N_f и N_φ – количество отсчетов функций $f(t)$ и $\varphi(\tau)$.

Доказательство. Обозначим через $H_p(l)$ коэффициенты ДПФ случайной последовательности $\{\eta_p(i)\}$, а $Z_p(l)$ – коэффициенты ДПФ последовательности $\{\zeta_p(i)\}$. Тогда ошибку $E_p(l) = K_{pq}(l) - \bar{K}_p(l)$ можно представить выражением

$$E_p(l) = \frac{-\tilde{\Phi}_p^c(l) Z_p(l) \bar{K}_p(l) + \tilde{\Phi}_p^c(l) H_p(l) - q_p(l) \bar{K}_p(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + q_p(l)}.$$

Возведем левую и правую части этого выражения в квадрат и вычислим условное математическое ожидание $\Delta_{pq}(l) = M \left[|E_p(l)|^2 / |\tilde{\Phi}_p(l)|^2 \right]$. Получим

$$\Delta_{pq}(l) = \frac{|\tilde{\Phi}_p^c(l)|^2 \left\{ M \left[|Z_p(l)|^2 \right] |\bar{K}_p(l)|^2 + M \left[|H_p(l)|^2 \right] \right\} + q_p^2(l) \left[|\bar{K}_p(l)|^2 \right]}{\left[|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + q_p(l) \right]^2}. \quad (7)$$

Введя обозначения дисперсий для коэффициентов ДПФ случайных последовательностей $\{\zeta_p(i)\}$, $\{\eta_p(i)\}$:

$$\sigma_{Z_p}^2 = M \left[|Z_p(l)|^2 \right], \quad \sigma_{H_p}^2 = M \left[|H_p(l)|^2 \right],$$

приходим к выражению (5) утверждения 1.

Для минимизации среднеквадратической ошибки регуляризованного решения достаточно минимизировать $\Delta_{pq}(l)$ для каждого $l = 0, \dots, N-1$. Беря частную производную от (5) по $q_p(l)$ и приравнивая эту производную нулю, получаем

Утверждение 2. Минимум $\Delta_{pq}(l)$ достигается при

$$q_{p \text{ opt}}(l) = \sigma_{Z_p}^2 + \frac{\sigma_{H_p}^2}{|\bar{K}_p(l)|^2}, \quad (8)$$

и коэффициенты ДПФ оптимального регуляризованного решения, имеющего наименьшую среднеквадратическую ошибку $\Delta_{pq}(l)$, определяются выражением

$$K_{p \text{ opt}}(l) = \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 (1 + S_{opt}(l))} \tilde{F}_p(l), \quad (9)$$

где $\tilde{\Phi}_p^c(l)$ – величина, комплексно сопряженная с $\tilde{\Phi}_p(l)$;

$$S_{opt}(l) = S_\zeta(l) + S_\eta(l) = \frac{\sigma_{Z_p}^2}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2} + \frac{\sigma_{H_p}^2}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 \cdot |\bar{K}_p(l)|^2}. \quad (10)$$

Соотношение $S_\zeta(l)$ можно трактовать как отношение «шум / сигнал» для коэффициентов ДПФ входного сигнала, а соотношение $S_\eta(l)$ – как отношение «шум / сигнал» для коэффициентов ДПФ выходного сигнала. Алгоритм (9) вычисления коэффициентов ДПФ искомого решения можно назвать «винеровским алгоритмом», так как он минимизирует среднеквадратическую ошибку (4). Очевидно, что, взяв обратное ДПФ от коэффициентов (9), каждый из которых имеет минимальную среднеквадратическую ошибку, получим оценку для импульсной переходной функции динамической системы с наименьшей среднеквадратической ошибкой.

К сожалению, алгоритм (9) нереализуем на практике, так как в отношении «шум/сигнал» выходного сигнала (второе слагаемое в (10)) входят неизвестные коэффициенты ДПФ $\bar{K}_p(l)$ искомой импульсной переходной функции. Заметим, что такая же ситуация возникает и в «классическом» винеровском алгоритме фильтрации случайных процессов, где требуется априорное знание спектральной плотности выделяемого случайного процесса. Возникает традиционный вопрос: «Что делать?». Для ответа на этот вопрос предлагается итерационная процедура апостериорного уточнения отношения $S_\eta(l)$, которая является нетривиальным обобщением процедуры уточнения отноше-

ния «шум / сигнал», успешно используемой при вычислении регуляризованного решения обратной измерительной задачи при точно заданном ядре интегрального уравнения (1) (см. [14]).

3. ИТЕРАЦИОННОЕ УТОЧНЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ «ШУМ / СИГНАЛ»

Так как отношение «шум / сигнал» коэффициентов ДПФ выходного сигнала $S_{\eta}(l)$ (в уравнении (10) это второе слагаемое) зависит от неизвестного коэффициента ДПФ $\bar{K}_p(l)$ точного решения, то предлагается следующая итерационная процедура апостериорного уточнения этого отношения, которая выполняется при вычислении каждого коэффициента ДПФ, т. е. для $l = 0, \dots, N-1$.

Введем величины:

$$\tilde{S}_{\eta}(l) = \frac{\sigma_{H_p}^2}{|\tilde{F}_p(l)|^2}, \quad \hat{S}_{\eta}^{(0)}(l) = \frac{\sigma_{H_p}^2}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 |\hat{K}_p^{(0)}(l)|^2}, \quad (11)$$

где $\hat{K}_p^{(0)}(l)$ – коэффициенты ДПФ «начальной» оценки $\hat{k}_p^{(0)}$ для искомой импульсной переходной функции (ее определение будет рассмотрено ниже). Перепишем выражение (9) в виде

$$K_{p \text{ opt}}(l) = \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 (1 + S_{\zeta}(l) + S_{\eta}(l))} \tilde{F}_p(l) \quad (12)$$

и подставим $\hat{S}_{\eta}^{(0)}(l)$ в это выражение вместо $S_{\eta}(l)$. Получим коэффициенты ДПФ на первой итерации:

$$\hat{K}_p^{(1)}(l) = \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 (1 + S_{\zeta}(l) + \hat{S}_{\eta}^{(0)}(l))} \tilde{F}_p(l).$$

Подставляя коэффициент $\hat{K}_p^{(1)}(l)$ в отношение «шум / сигнал» выходного сигнала, получаем оценку

$$\hat{S}_{\eta}^{(1)}(l) = \frac{\sigma_{H_p}^2}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 |\hat{K}_p^{(1)}(l)|^2}.$$

Продолжая такое итерационное уточнение отношения «шум / сигнал», получаем следующую итерационную процедуру:

$$\widehat{K}_p^{(n+1)}(l) = \frac{\widetilde{\Phi}_p(l)}{|\widetilde{\Phi}_p(l)|^2 (1 + S_\zeta(l) + \widehat{S}_\eta^{(n)}(l))} \widetilde{F}_p(l); \quad (13)$$

$$\widehat{S}_\eta^{(n)}(l) = \frac{\sigma_{H_p}^2}{|\widetilde{\Phi}_p(l)|^2 |\widehat{K}_p^{(n)}(l)|^2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

Возникает вопрос о сходимости этой итерационной процедуры уточнения отношения «шум / сигнал» выходного сигнала. Можно показать, что предельные точки этой процедуры определяются корнями $\widehat{S}_\eta^*(l)$ нелинейного уравнения

$$\widehat{S}_\eta^*(l) = \left[1 + S_\zeta(l) + \widehat{S}_\eta^*(l) \right] \widetilde{S}_\eta(l).$$

Выполнив несложные преобразования, приходим к квадратному уравнению

$$(\widehat{S}_\eta^*(l))^2 + \left[2(1 + S_\zeta(l)) - \frac{1}{\widetilde{S}_\eta(l)} \right] \widehat{S}_\eta^*(l) + (1 + S_\zeta(l))^2 = 0, \quad (15)$$

корни которого обозначим при этом как $\widehat{S}_{\eta 1}^*(l) \leq \widehat{S}_{\eta 2}^*(l)$. Эти корни равны:

$$\widehat{S}_{\eta 1}^*(l) = \frac{1 - 2(1 + S_\zeta) \widetilde{S}_\eta - \sqrt{1 - 4(1 + S_\zeta) \widetilde{S}_\eta}}{2 \widetilde{S}_\eta},$$

$$\widehat{S}_{\eta 2}^*(l) = \frac{1 - 2(1 + S_\zeta) \widetilde{S}_\eta + \sqrt{1 - 4(1 + S_\zeta) \widetilde{S}_\eta}}{2 \widetilde{S}_\eta}$$

при очевидном условии их вещественности

$$(1 + S_\zeta) \widetilde{S}_\eta \leq \frac{1}{4}.$$

Тогда из выражений (9), (10) следует

Утверждение 3. Предельная точка \hat{K}_p^* итерационной процедуры (13) определяется выражением

$$\hat{K}_p^*(l) = \begin{cases} \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 (1 + S_\zeta(l) + \hat{S}_{\eta 1}^*(l))} \tilde{F}_p(l), & \text{если } \hat{S}_\eta^{(0)} < \hat{S}_{\eta 2}^*(l) \\ & \text{и } \tilde{S}_\eta(l) (1 + S_\zeta(l)) \leq \frac{1}{4}; \\ \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 (1 + S_\zeta(l) + \hat{S}_{\eta 2}^*(l))} \tilde{F}_p(l), & \text{если } \hat{S}_\eta^{(0)} = \hat{S}_{\eta 2}^*(l) \\ & \text{и } \tilde{S}_\eta(l) (1 + S_\zeta(l)) \leq \frac{1}{4}; \\ 0, & \text{если } \tilde{S}_\eta(l) (1 + S_\zeta(l)) \leq \frac{1}{4}, \quad \hat{S}_\eta^{(0)} > \hat{S}_{\eta 2}^*(l); \\ 0, & \text{если } \tilde{S}_\eta(l) (1 + S_\zeta(l)) > \frac{1}{4}. \end{cases} \quad (16)$$

Доказательство этого утверждения проводится аналогично доказательству в работах [14], но с учетом отношения «шум / сигнал» входного сигнала идентифицируемой системы.

Взяв обратное ДПФ от последовательности $\{\hat{K}_p^*(l)\}$, получаем периодическую последовательность $\{\hat{k}_p^*(i)\}$, из которой формируется оценка $\hat{k}^*(\tau_i)$ для импульсной переходной функции динамической системы в дискретные моменты времени:

$$\hat{k}^*(\tau_i) = \hat{k}_p^*(i), \quad i = 0, \dots, N_k - 1.$$

Заметим, что соотношение (16) позволяет, не выполняя итераций (13) и (14), сразу вычислить предельную точку итерационной процедуры, что существенно уменьшает затраты на вычисление коэффициентов ДПФ $\hat{K}_p^*(l)$.

Для того чтобы предлагаемый локальный алгоритм идентификации был регуляризирующим, необходимо убедиться в сходимости решения $\hat{k}^*(\tau)$ к «точной» ИПФ $\bar{k}(\tau)$ при стремлении уровней шумов измерений входного и выходного сигналов идентифицируемой системы к нулю. Определим среднеквадратическую сходимость построенного решения как

$$M \left[\|\hat{k}^* - \bar{k}\|^2 \right] \rightarrow 0 \quad \text{при } \sigma_\eta^2, \sigma_\zeta^2 \rightarrow 0, \quad (17)$$

где \hat{k}^* , \bar{k} – векторы размерности N_k , составленные из значений $\hat{k}^*(\tau_i)$, $\bar{k}(\tau_i)$ соответственно.

Утверждение 4. Если начальный вектор $\hat{k}^{(0)}$, составленный из значений $\hat{k}^{(0)}(\tau_i)$ «стартовой» функции $\hat{k}^{(0)}(\tau)$, сходится в среднеквадратическом к вектору точного решения \bar{k} , т. е.

$$M \left[\left\| \hat{k}^{(0)} - \bar{k} \right\|^2 \right] \rightarrow 0 \text{ при } \sigma_{\eta}^2, \sigma_{\xi}^2 \rightarrow 0, \quad (18)$$

то имеет место сходимость (17).

Доказательство этого утверждения проводится аналогично доказательству в работе [14], но с учетом отношения «шум / сигнал» входного сигнала идентифицируемой системы.

Таким образом, предложенный алгоритм построения решения является регуляризирующим, и его можно назвать *квазиоптимальным локальным регуляризирующим алгоритмом*. Слово «квазиоптимальный» отражает итерационное уточнение отношения «шум / сигнал» выходного сигнала идентифицируемой системы.

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО АЛГОРИТМА

Приведенный локальный регуляризирующий алгоритм достаточно прост в вычислительной реализации. Однако он включает два момента, которые могут вызвать затруднения при практическом его использовании.

Первое затруднение обусловлено тем, что ряд соотношений (например, (10), (11), (14)) включают дисперсии $\sigma_{Z_p}^2$ и $\sigma_{H_p}^2$ соответствующих коэффициентов ДПФ, и для их вычисления необходимо задание дисперсий σ_{η}^2 и σ_{ξ}^2 , которые, как правило, неизвестны или известны с большой ошибкой.

Второе затруднение вызвано необходимостью задать такой «стартовый» вектор $\hat{k}^{(0)}$ для итерационной процедуры, который бы удовлетворял условию (18).

Для устранения первого затруднения приведем оценки для $\sigma_{Z_p}^2$ и $\sigma_{H_p}^2$, являющиеся обобщением оценки, построенной в работе [5]. Вначале рассмотрим последовательность $\{\tilde{f}_p(i)\}$, элементы которой можно представить как сумму элементов последовательности «точной» правой части и элементов последовательности шума правой части, т. е.

$$\tilde{f}_p(i) = f_p(i) + \eta_p(i).$$

Так как шум измерения $\eta(t)$ имеет более широкий спектр мощности, то коэффициенты ДПФ $\tilde{F}_p(l)$ правой части интегрального уравнения в некоторой окрестности точки $l = N/2$ определяются только погрешностями $\eta(t_j)$.

В качестве иллюстрации этого положения на рис. 1 показан график квадрата модуля $|\tilde{F}_p(l)|^2$ при $N = 256$.

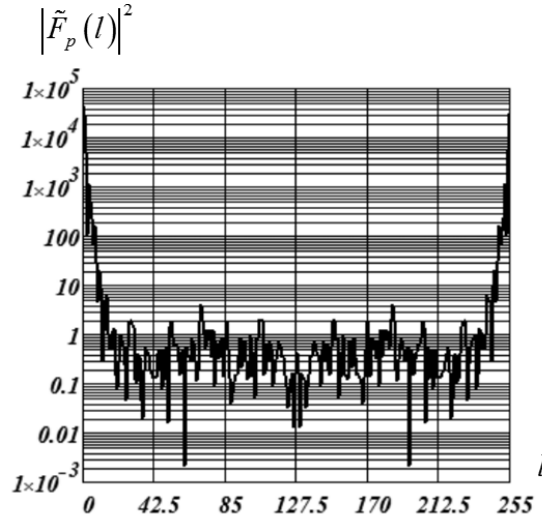


Рис. 1. Графики значений $|\tilde{F}_p(l)|^2$ выходного сигнала

Видно, что

- $|\tilde{F}_p(l)|^2$ симметричен относительно точки $l = N/2 = 128$;
- в диапазоне значений $l \in [30, 220]$ коэффициенты $|\tilde{F}_p(l)|^2$ в основном обусловлены шумом правой части (так как колеблются относительно постоянного уровня, примерно равного 0,3) и могут быть использованы для построения оценки для $\sigma_{H_p}^2$.

Поэтому оценку для $\sigma_{H_p}^2$ определим как

$$D_H(L_H) = \frac{1}{2L_H + 1} \sum_{l=-L_H}^{L_H} \left| \tilde{F}_p\left(\frac{N}{2} + l\right) \right|^2. \quad (19)$$

Можно показать, что при сделанном выше предположении и соответствующем выборе L_H величина $D_H(L_H)$ является несмещенной оценкой для $\sigma_{H_p}^2$.

Так как оценка $D_H(L_H)$ является случайной величиной, то был проведен многочисленный эксперимент по вычислению выборочного среднего

$$m_H(L_H) = \frac{1}{N_{sam}} \sum_{l=1}^{N_{sam}} D_H^{(l)}(L_H),$$

где оценка $D_H^{(l)}(L_H)$ вычисляется по l -й реализации правой части, и выборочного среднеквадратического отклонения $s_H(L_H)$ по формуле

$$s_H(L_H) = \sqrt{\frac{1}{N_{sam} - 1} \sum_{l=1}^{N_{sam}} \left[D_H^{(l)}(L_H) - m_H(L_H) \right]^2}$$

этой случайной величины для разных уровней шума и форм выходного сигнала. На рис. 2 показаны типичные графики этих выборочных характеристик (объем выборки $N_{sam} = 50$) как функции от величины L_H .

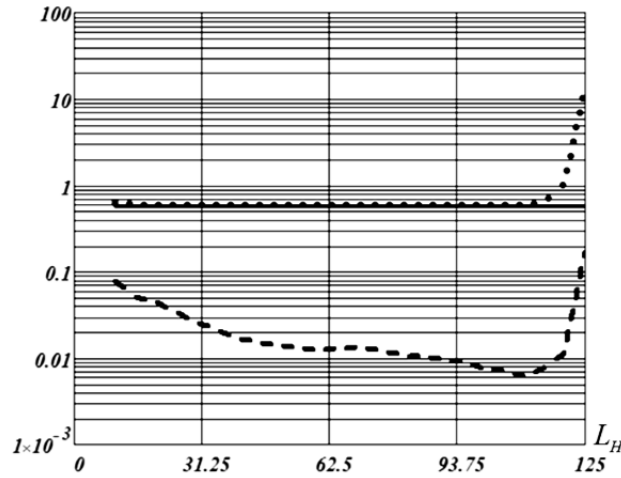


Рис. 2. Выборочные характеристики оценки $D_H(L_H)$

Точное значение дисперсии $\sigma_{H_p}^2$ определялось по формуле (6) и было равно 0,581 (на рис. 2 сплошная прямая). Значения $m_H(L_H)$ на рисунке показаны точечной кривой, а значения $s_H(L_H)$ – штриховой кривой. Видно, что при первоначальном увеличении L_H точность оценки увеличивается за счет увеличения объема выборки, равного $2L + 1$, при этом смещение оценки (т. е. разница $\sigma_{H_p}^2 - m_H(L_H)$) остается незначительным. При дальнейшем увеличении L_H ($L_H > 110$) появляется заметное смещение оценки (т. е. уменьшение точности оценки) из-за включения в выборку коэффициентов ДПФ, содержащих информацию о точной правой части. На практике можно рекомендовать выбирать L_H из интервала $[N/4, N/3]$.

По аналогии в качестве оценки для дисперсии $\sigma_{Z_p}^2$ можно принять величину

$$D_Z(L_Z) = \frac{1}{2L_Z + 1} \sum_{l=-L_Z}^{L_Z} \left| \tilde{\Phi}_p \left(\frac{N}{2} + l \right) \right|^2. \quad (20)$$

На практике можно рекомендовать выбирать L_Z также из интервала $[N/4, N/3]$.

Таким образом оценки (19) и (20) позволяют преодолеть затруднения, возникающие при построении предложенного локального алгоритма идентификации и обусловленные незнанием величин дисперсий шумов измерений входного и выходного сигналов идентифицируемой системы.

Второе затруднение, связанное с заданием «стартового» вектора $\hat{k}^{(0)}$, который должен удовлетворять условию (17), можно преодолеть, приняв в качестве $\hat{k}^{(0)}$ вектор регуляризованного решения k_α . Это решение строится с использованием глобального регуляризирующего алгоритма [5, 6], который учитывает шум измерения входного сигнала не только при нахождении устойчивого решения, но и при выборе параметра регуляризации. Построенный на основе критерия оптимальности алгоритм выбора параметра регуляризации гарантирует среднеквадратическую сходимость k_α к точному решению при $\sigma_\eta^2, \sigma_\xi^2 \rightarrow 0$. Таким образом, вектор $\hat{k}^{(0)} = k_\alpha$ будет удовлетворять условию (17) и может быть принят в качестве «стартового» вектора для итерационной процедуры (13) и (14).

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ

Для обоснованного применения предложенного локального алгоритма идентификации на практике необходимо ответить на вопрос: как соотносятся между собой ошибки идентификации локальным регуляризирующим алгоритмом и глобальным регуляризирующим алгоритмом [5, 6], который также учитывает шум измерения входного сигнала как при нахождении устойчивого решения, так и при выборе параметра регуляризации. Для ответа на этот вопрос был проведен обширный вычислительный эксперимент по построению регуляризованных решений двумя этими алгоритмами и сравнению ошибок этих решений. Остановимся на некоторых результатах этого эксперимента.

В качестве импульсной переходной функции использовались два вида функций, графики которых приведены на рис. 3: «гладкая» ИПФ – кривая 1 (будем обозначать ИПФ1); «колебательная» ИПФ – кривая 2 (ИПФ2). Входной сигнал задавался двумя функциями: «узкополосным» сигналом – кривая 1 на рис. 4 (обозначим ВХОД1) и «широкополосным» – кривая 2 на рис. 4 (обозначим ВХОД2). Такой выбор входных сигналов был обусловлен тем, что для широкополосного сигнала при прочих равных условиях точность оценивания ИПФ возрастает. Количество отсчетов $k(\tau_j)N_k = 100$, количество отсчетов входного сигнала $\varphi(\tau_j)N_\varphi = 60$, $N_f = N_\varphi + N_k - 1 = 159$ и $N = 256$. Шаг дискретизации $\Delta_t = 0,022$. Шумы измерения как входного, так и выходного сигналов моделировались псевдослучайными величинами с нормальным распределением, нулевым средним и дисперсией, определяемой

относительными уровнями шума. При этом относительные уровни шума правой части δ_f и шума измерения входного сигнала δ_φ определялись соотношениями $\delta_f = \frac{\|\eta\|}{\|f\|}$ и $\delta_\varphi = \frac{\|\zeta\|}{\|\varphi\|}$, где f и φ – векторы размерности N_f и N_φ , составленные из значений $f(t_i)$ и $\varphi(\tau_j)$ соответственно; $\|\cdot\|$ – евклидова норма вектора. Точность решения k_{α_W} (глобальный регуляризирующий алгоритм с параметром регуляризации α_W , вычисленным на основе критерия оптимальности [5, 6]) определялась относительной ошибкой $\delta_k(\alpha_W) = \frac{\|k_{\alpha_W} - \bar{k}\|}{\|\bar{k}\|}$, точность решения \hat{k}^* (предложенный алгоритм идентификации) – $\delta_k^* = \frac{\|\hat{k}^* - \bar{k}\|}{\|\bar{k}\|}$. Для сопоставления этих двух ошибок введем коэффициент эффективности K_{eff} локального алгоритма идентификации, определяемый соотношением

$$K_{eff} = \frac{\delta_k(\alpha_W)}{\delta_k^*} = \frac{\|k_{\alpha_W} - \bar{k}\|}{\|\hat{k}^* - \bar{k}\|}. \quad (21)$$

Если $K_{eff} > 1$, то предпочтение следует отдать локальному алгоритму идентификации, в противном случае – глобальному алгоритму.

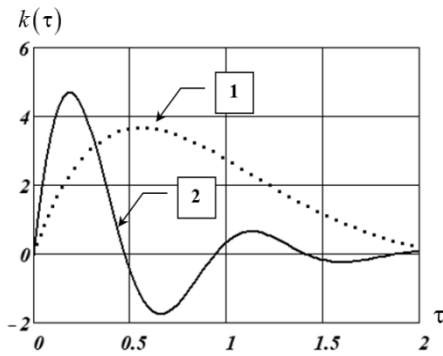


Рис. 3. Импульсные переходные функции $k(\tau)$

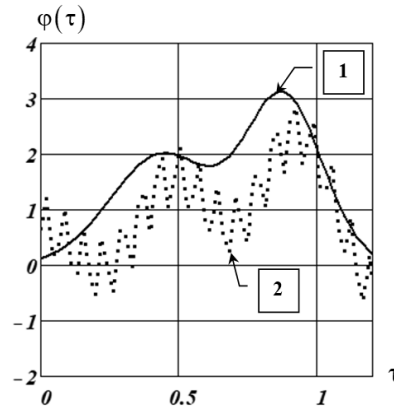


Рис. 4. Входные сигналы системы

Заметим, что коэффициент K_{eff} является случайной величиной, значение которой меняется от одной реализации шумов измерений к другой. По-

этому в качестве неслучайной характеристики использовалось выборочное среднее \bar{K}_{eff} , определяемое выражением

$$\bar{K}_{eff} = \frac{1}{N_{sam}} \sum_{l=1}^{N_{sam}} K_{eff}^{(l)},$$

где $K_{eff}^{(l)}$ – коэффициент эффективности, вычисленный по l -й реализации шумов измерений. Объем выборки в эксперименте $N_{sam} = 50$.

В работе [15] было показано следующее:

- большее влияние на ошибку идентификации оказывает уровень шума измерения правой части, чем уровень шума входного сигнала;
- если уровень шума измерения входного сигнала меньше или соизмерим с уровнем шума выходного сигнала, то значения параметров регуляризации, при которых достигаются минимальные ошибки идентификации практически совпадают как для точно заданного, так и неточно заданного входных сигналов (хотя сами ошибки идентификации различны).

Поэтому в вычислительном эксперименте принимался высокий относительный уровень шума входного сигнала $\delta_\varphi = 0,10$ (чтобы влияние этого шума на ошибку идентификации проявилось в полной мере), а уровни шума выходного сигнала δ_f задавались равными 0,02; 0,05 и 0,10.

В табл. 1 приведены средние значения коэффициента эффективности \bar{K}_{eff} при идентификации ИПФ1 с двумя входными сигналами ВХОД1 и ВХОД2, а в табл. 2 – при идентификации ИПФ2.

Таблица 1

Коэффициенты эффективности при идентификации ИПФ1

Уровень шума δ_f	Значения коэффициента эффективности \bar{K}_{eff}	
	ВХОД1	ВХОД2
0,02	1,12	1,15
0,05	1,09	1,11
0,10	1,05	1,06

Таблица 2

Коэффициенты эффективности при идентификации ИПФ2

Уровень шума δ_f	Значения коэффициента эффективности \bar{K}_{eff}	
	ВХОД1	ВХОД2
0,02	1,14	1,15
0,05	1,11	1,12
0,10	1,07	1,08

Анализируя приведенные значения \bar{K}_{eff} , можно сделать следующие выводы:

- для всех уровней шума правой части и используемых входных сигналов более предпочтительным является локальный регуляризирующий алгоритм идентификации (так как $\bar{K}_{eff} > 1$);
- по мере увеличения уровня шума измерения правой части значение коэффициента эффективности уменьшается, но он остается больше единицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный локальный регуляризирующий алгоритм идентификации имеет высокую вычислительную эффективность, обусловленную как алгоритмом быстрого преобразования Фурье (для вычисления прямого и обратного ДПФ), так и алгоритмом вычисления коэффициентов ДПФ регуляризованного решения (достаточно простые скалярные вычисления). Он позволяет строить устойчивые решения с ошибками, меньше чем ошибки регуляризованных решений, зависящие только от одного параметра регуляризации. Алгоритм может быть использован для параметрической идентификации динамической системы, математической моделью которой выступает интегральное уравнение Фредгольма I рода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Greblicki W., Pawiak M.* Nonparametric system identification. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 400 p.
2. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректно поставленных задач. – М.: Наука, 1979. – 278 с.
3. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончаровский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. – М.: Наука, 1990. – 231 с.
4. *Морозов В.А., Гребенников А.И.* Методы решения некорректно поставленных задач: алгоритмический аспект. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 319 с.
5. *Воскобойников Ю.Е.* Устойчивые алгоритмы решения обратных измерительных задач. – Новосибирск: Сибстрин, 2007. – 184 с.
6. *Воскобойников Ю.Е., Литасов В.А.* Устойчивый алгоритм восстановления изображений при неточно заданной аппаратной функции // *Автометрия*. – 2006. – № 6. – С. 13–22.
7. *Воскобойников Ю.Е., Литасов В.А.* Регуляризирующий алгоритм непараметрической идентификации при неточных исходных данных // *Научный вестник НГТУ*. – 2005. – № 2 (20). – С. 33–45.
8. *Арсенин В.Я., Криксин Ю.А., Тимонов А.А.* Метод локальной регуляризации линейных операторных уравнений и его приложения // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 1988. – Т. 28, № 6. – С. 793–802.
9. Information complexity-based regularization parameter selection for solution of ill conditioned inverse problems / A.M. Urmanov, A.V. Gribok, H. Bozdogan, J.W. Hines, R.E. Uhrig // *Inverse Problems*. – 2002. – Vol. 18, N 2. – P. L1–L9.
10. *Vogel C.R.* Non-convergence of L-curve regularization parameter selection method // *Inverse Problems*. – 1996. – Vol. 12, N 4. – P. 535–547.
11. *Lukas M.A.* Comparison of parameter choice methods for regularization with discrete noisy data // *Inverse Problems*. – 2000. – Vol. 14, N 2. – P. 161–184.
12. *Engl H.W., Hanke M., Neubauer F.* A regularization of inverse problems. – Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. – 383 p.

13. Титаренко В.Н., Ягола А.Г. Применение метода GVC для корректных и некорректных задач // Вестник МГУ. Серия 3, Физика, астрономия. – 2000. – № 4. – С. 15–18.

14. Voskoboïnikov Yu.E., Mukhina I.N. Regularizing algorithm for image and signal reconstructions with refinement of the local noise to signal ratios // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 1999. – N 4. – P. 60–70.

15. Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Непараметрическая идентификация динамической системы при неточном входном сигнале // Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 4 (22). – С. 86–93.

Воскобойников Юрий Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики НГАСУ (Сибстрин), профессор кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета, заслуженный работник Высшей школы РФ. Основные направления научных исследований: решение некорректных задач интерпретации данных, задачи вычислительной томографии и идентификации динамических систем, фильтрация сигналов и изображений. Имеет более 290 научных публикаций, 6 монографий, 16 учебников и учебных пособий. E-mail: voscob@mail.ru

Крысов Данила Алексеевич, аспирант кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. E-mail: Tomahawk.RUS@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-19-38

A local regularizing algorithm of nonparametric identification of an inaccurate input signal object*

YU.E. VOSKOBOINIKOV^{1,2}, D.A. KRYSOV³

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Phys. & Math.), professor. E-mail: voscob@mail.ru*

² *Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN), 113, Lenin-gradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation, D. Sc. (Phys. & Math.), professor. E-mail: voscob@mail.ru*

³ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD student. E-mail: Tomahawk.RUS@gmail.com*

As a model of a stationary dynamical system, Volterra Integral Equation of the First Kind with a difference kernel is often used. For such a model, the problem of nonparametric identification consists in estimating this difference kernel (called the impulse response function) from the measured values of the input and output signals of an identifiable dynamical system. As you know, this problem is ill-posed, i.e. the solution may not exist, be not a unique one and be unstable with respect to the errors (measurement noise) of the original data. To obtain a unique stable (but approximate) solution, various methods of regularization are used, in particular, the A.N. Tikhonov regularization method [1, 2]. In this case, the computational basis of the algorithms implementing these methods is the discrete Fourier transform (DFT) [3, 4]. A characteristic feature of these algorithms is that the DFT coefficients of the regularized solution depend on one parameter called the regularization parameter. By choosing this parameter, an acceptable accuracy of the regularized solution and its convergence are achieved. In this case (with respect to the identification problem under consideration) it is assumed that an input signal (the kernel of the integral equation) is specified exactly, and an output signal of the system is recorded with some random error. However, this assumption is rarely satisfied in practice as

* Received 12 September 2017.

the input and output signals of the system are measured and recorded by devices of approximately the same accuracy class and, consequently, both input and output signals are prescribed with arbitrary measurement noises. In the works of the author (for example, [4-6]), for the case when these noises were not correlated, a regularizing algorithm was proposed which took noises into account both in finding a stable solution and in estimating an optimal regularization parameter. However, the presence of only one control parameter, i.e. the regularization parameter, does not allow us to select a regularizing factor for every DFT coefficient that minimizes an error in calculating this coefficient and the entire regularized solution as a whole. Therefore, in this paper we propose an approach to finding a regularized solution of its quasi-optimal regularizing factor based on the condition of a minimum root-mean-square identification error for every DFT coefficient. An iterative procedure is developed for the signal-to-noise ratio relation included in the regularizing factor and the limit points of this procedure are found. The computational experiment performed showed a higher accuracy of identification by the proposed local regularizing algorithm in comparison with the regularizing algorithm which depends on one regularization parameter.

Keywords: Nonparametric identification, optimal regularizing algorithm, ill-posed problems, local regularization algorithm for identification, Volterra integral equation of the first kind, iterative procedure for calculation of the local Signal-to-Noise ratio, convergence of the regularized solution of the identification problem, efficiency of the local regularization algorithm for identification.

REFERENCES

1. Greblicki W., Pawlak M. *Nonparametric system identification*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 400 p.
2. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektno postavlennykh zadach* [Methods for the Solution of Ill-Posed Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 278 p.
3. Tikhonov A.N., Goncharovskii A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. *Chislennyye metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Numerical Methods for the Solution of Ill-Posed Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 231 p.
4. Morozov V.A., Grebennikov A.I. *Metody resheniya nekorrektno postavlennykh zadach: algorit-micheskii aspekt* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow, MSU Publ., 1992. 319 p.
5. Voskoboinikov Yu.E. *Ustoichivyye algoritmy resheniya obratnykh izmeritel'nykh zadach* [A stable algorithms for solving inverse measurement problems]. Novosibirsk, SIBSTRIN Publ., 2007. 184 p.
6. Voskoboinikov Yu.E., Litasov V.A. Ustoichivyy algoritm vosstanovleniya izobrazhenii pri netochno zadannoi apparatnoi funktsii [A stable image reconstruction algorithm for inexact point-spread function]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2006, no. 6, pp. 13–22. (In Russian).
7. Voskoboinikov Yu.E., Litasov V.A. Regulyariziruyushchii algoritm neparametricheskoi identifikatsii pri netochnykh iskhodnykh dannykh [Regularizing algorithm for nonparametric identification with inaccurate initial data]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2005, no. 2 (20), pp. 33–45.
8. Arsenin V.Ya., Kriksin Yu.A., Timonov A.A. A local regularization method for linear operator equations of the first kind and its applications. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1988, vol. 28, iss. 3, pp. 113–125. doi: 10.1016/0041-5553(88)90188-7. Translated from *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 1988, vol. 28, no. 6, pp. 793–802.
9. Urmanov A.M., Gribok A.V., Bozdogan H., Hines J.W., Uhrid R.E. Information complexity-based regularization parameter selection for solution of ill conditioned inverse problems. *Inverse Problems*, 2002, vol. 18, no. 2, pp. L1–L9.
10. Vogel C.R. Non-convergence of L-curve regularization parameter selection method. *Inverse Problems*, 1996, vol. 12, no. 4, pp. 535–547.

11. Lukas M.A. Comparison of parameter choice methods for regularization with discrete noisy data. *Inverse Problems*, 2000, vol. 14, no. 2, pp. 161–184.
12. Engl H.W., Hanke M., Neubauer F. *A regularization of inverse problems*. Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publishers, 2000. 383 p.
13. Titarenko V.N., Yagola A.G. Primenenie metoda GVC dlya korrektnykh i nekorrektnykh zadach [Applying the GVC method for correctly posed and ill-posed problems]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 3, Fizika. Astronomiya – Moscow University Physics Bulletin*, 2000, no. 4, pp. 15–18. (In Russian).
14. Voskoboinikov Yu.E., Mukhina I.N. Regularizing algorithm for image and signal reconstructions with refinement of the local noise to signal ratios. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 1999, no. 4, pp. 60–70.
15. Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. Neparametricheskaya identifikatsiya dinamicheskoi sistemy pri netochnom vkhodnom signale [Nonparametric identification of a dynamic system with an inaccurate input signal]. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya – Automatics & Software Enginery*, 2017, no. 4, pp. 86–93.

Для цитирования:

Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Локальный регуляризирующий алгоритм непараметрической идентификации объекта с неточным входным сигналом // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 19–38. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-19-38.

For citation:

Voskoboinikov Yu.E., Krysov D.A. Lokal'nyi regulyariziruyushchii algoritm neparametricheskoi identifikatsii ob"ekta s netochnym vkhodnym signalom [A local regularizing algorithm of nonparametric identification of an inaccurate input signal object]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 19–38. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-19-38.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 62-83

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-39-50

Многокритериальный синтез многомерного управления электроприводом переменного тока*

А.С. ВОСТРИКОВ¹, Е.В. ПРОХОРЕНКО², Ю.П. ФИЛЮШОВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: vostrikov@nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: prokhorenko@corp.nstu.ru

³ 630092, РФ, г. Новосибирск, ул. Объединения 1А, Федеральное государственное унитарное предприятие ПО «Север» кандидат технических наук, инженер. E-mail: filushov@mail.ru

Определены аргументы, в зависимости от которых установлены аналитические связи силовых и энергетических характеристик электропривода переменного тока в виде трех функций энергетического состояния. В качестве характеристик выступают электромагнитный момент, энергия магнитного поля, тепловые потери и напряжение. Используя функции энергетического состояния, посредством показателей качества установлены связи основных свойств электропривода переменного тока с учетом величины реактивной мощности, потерь в стали, потерь в меди, насыщения магнитной системы двигателя, мощности мгновенного изменения энергии магнитного поля при формировании электромагнитного момента, эффективности использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. В зависимости от технологических требований разработано правило выбора решений многокритериальной оптимизации электропривода. Разработанное правило позволяет формализовать задачу многокритериального управления, учитывая потери в стали и насыщение магнитной системы двигателя. В качестве показателей качества выступают: энергетическая эффективность, показатель интенсивности процессов электромеханического преобразования энергии, показатели эффективности использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Методом обратной модели с линеаризацией по выходу сформировано многомерное управление электроприводом, позволяющее изменять выходные величины в функции скорости, тока или насыщения магнитной системы двигателя. В качестве выходных величин наряду с электромагнитным моментом выступают энергетические свойства электропривода. С использованием вариационных методов определены условия управления, обеспечивающего изменение состояния электрической машины за минимальное время при установленных ограничениях. Предложенная методология синтеза управления способствует решению практически важных задач энергосбережения высокодинамичных систем воспроизведения движения большой и малой мощности.

* Статья получена 13 августа 2017 г.

Ключевые слова: электропривод переменного тока, критерии качества, многокритериальная оптимизация, многомерное управление, показатели качества, метод Лагранжа в форме Понtryгина, критерий качества быстрогодействия, метод обратной модели с линеаризацией по выходу, типовой характер изменения выходных величин

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность основывается на широком применении электрического привода (ЭП) в технологических процессах. Электропривод является не только средством управления технологическими процессами, но и энергосиловой установкой, обеспечивающей производственные механизмы необходимой энергией. Общепромышленные и уникальные промышленные установки оборудуются регулируемыми приводами переменного тока, мощность которых составляет от единиц до сотен и тысяч киловатт. Потребляя более 60 % всей вырабатываемой в мире электроэнергии, электропривод проникает все глубже в автоматизацию производства. Конструктивно электрическая машина электропривода выполняется таким образом, чтобы в номинальных режимах работы потери в двигателе были минимальны, а оценка эффективности использования мощности $\cos(\varphi)$, подводимой к обмоткам двигателя, имела наилучшее значение. Вместе с тем снижение нагрузки на 50 % от номинальной величины вызывает снижение КПД до 40...60 % [1]. В процессе исторического развития быстродействующий электропривод достиг высокого уровня совершенства, обеспечивая высокие динамические свойства, удовлетворяющие самым разнообразным технологическим задачам. Являясь энергосиловой установкой, электропривод должен наилучшим образом отвечать не только динамическим, но и энергетическим требованиям, учитывая ограничения источника питания.

1. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Предъявляемые к электроприводу технологические требования обусловлены желанием повысить производительность технологических процессов и максимально снизить потери энергии. Для решения задачи эффективного управления необходимо сопоставить основные свойства электропривода, учитывая величину реактивной мощности, потери в стали, потери в меди, нелинейность характеристики намагничивания, мощность мгновенного изменения энергии магнитного поля при формировании электромагнитного момента, эффективность использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Основные свойства электропривода зависят от нагрузки и имеют противоречивый характер, что значительно усложняет решение задачи эффективного управления, обеспечивающего наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода. Эффективное управление электроприводом обуславливает многокритериальный подход к синтезу управления. Сложность заключается в том, что не разработано правило (принцип оптимальности), которое позволило бы ответить на вопрос, какое решение лучше для реализации предъявляемых к электроприводу технологических требований. Необходимо определить аргументы, характеризующие

закон управления, и установить перечень показателей качества, определяющих динамические и энергетические свойства электропривода в зависимости от выбранных аргументов. Задавая один критерий качества, ограничивая область допустимых управлений, следует определить другие локальные критерии, которые в этих условиях имеют наилучшее значение. Поэтому решение задачи комплексного (многокритериального) подхода к синтезу управления электроприводом, обеспечивающему наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода в рамках установленных ограничений, требует своего решения.

Процесс формализации многокритериальных задач неизбежно связан с экспертными оценками как самих критериев качества, так и связей между ними. Обычно из физического смысла задачи следует, что локальные критерии имеют различную важность при решении задачи, т. е. один локальный критерий имеет какой-то приоритет над другим критерием. Это следует учитывать при выборе принципа оптимальности и определения области возможных решений, отдавая предпочтение более важным критериям. Основанный на суждении экспертов по вкладу каждого критерия качества в общую оценку, метод анализа иерархий [2] не позволяет говорить об объективном решении задачи управления электроприводом. Отсутствие правила не дает возможности формализовать задачу управления, обеспечивающего эффективное использование электрической машины и источника питания для реализации технологических требований.

2. РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В настоящее время требования к динамическим и энергетическим свойствам определяют два различных направления развития электропривода переменного тока. Одно из них определяет энергоэффективное управление, обеспечивающее формирование электромагнитного момента при минимуме тока статора или минимуме суммарных потерь [3]. Это направление получило развитие в работах В.Г. Макарова, В.Н. Полякова и Р.Т. Шрейнера, где, учитывая насыщение магнитной системы двигателя, анализируются связи энергетических характеристик для реализации экстремального управления электроприводом [4]. Несмотря на несомненное достоинство, такие электроприводы не отличаются высоким быстродействием. Рост реактивной мощности снижает эффективность управления, не позволяя быстро парировать возмущение в условиях ограничения напряжения источника питания, снижая качество и производительность технологических процессов. Формирование экстремального управления по одному критерию качества не дает возможность оценить другие локальные критерии, показатели которых могут быть такими, что сформированное управление не может быть целесообразным [5]. Нелинейность характеристики намагничивания в совокупности с нелинейной связью регулируемых переменных и электромагнитного момента значительно усложняет задачу экстремального управления электроприводом, не позволяя контролировать динамику процессов [6].

Для высокодинамичных систем воспроизведения движения, по аналогии с машинами постоянного тока, управление формируют при стабилизации энергии магнитного поля, частным случаем которого является формирование

электромагнитного момента при стабилизации потокосцепления статора, ротора или потокосцепления в воздушном зазоре. Это направление обосновано в работе Blachke F. 1971 г. и до настоящего времени считается доминирующим в системах векторного управления машинами переменного тока [7]. При избытке энергии магнитного поля часть ресурсов управления направляют на стабилизацию потокосцепления, обеспечивая линеаризацию системы, приведя структуру управления к одноканальному виду. Но формирование электромагнитного момента в этих условиях не отличается экономичностью, поскольку поддерживать потокосцепление на уровне номинальной величины при различной нагрузке двигателя энергетически неэкономично. Быстродействие одноканальной системы связано с возможностью источника питания и ограничено полосой пропускания контуров регулируемых переменных. Используя все ресурсы управления, здесь нет возможности увеличивать энергию или мощность, затрачиваемую на регулирование. Известны системы прямого управления электромагнитным моментом (direct torque control). Такие системы, ограниченные по быстродействию напряжением источника питания, характеризуются существенными пульсациями электромагнитного момента, снижающими точность регулирования на малой скорости. Известный метод градиентного управления позволяет отыскивать аналитическое выражение регулятора, обеспечивающего движение к цели управления с максимальной интенсивностью исходя из текущего состояния объекта управления. Сложность формализации задачи, выбор целевой функции и весовых коэффициентов значительно усложняют решение задачи эффективного управления. Высокие требования к вычислительным ресурсам системы и ограничение напряжения питания вносят существенные погрешности регулирования, не позволяя использовать все возможности электрической машины [8].

Обобщая методы и способы управления, на примере обобщенной электрической машины рассматривается методология синтеза управления электроприводом переменного тока, обеспечивающего наряду с типовым характером формирования электромагнитного момента регулирование основных свойств электропривода. Разработанная методология базируется на двух концептуальных положениях, доказательство которых позволило сформировать новую систему взглядов на комплексный подход синтеза многомерного управления машинами переменного тока различного типа. Одно положение определяет условия изменения состояния электрической машины за минимальное время при формировании выходных величин. Другое концептуальное положение включает исследование связей основных свойств работы электрической машины, на основании которых разработано правило многокритериальной оптимизации работы электропривода.

3. ПРАВИЛО ВЫБОРА РЕШЕНИЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Модель обобщенной машины переменного тока, описываемой системой уравнений Кирхгофа в системе неподвижных или вращающихся координат:

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}\mathbf{I} + \omega\mathbf{D}\Psi + \frac{d\Psi}{dt}; \quad \mathbf{U} = [u_d \quad u_q \quad u_{rd} \quad u_{rq}]^T,$$

$$\Psi = [\Psi_d \quad \Psi_q \quad \Psi_{rd} \quad \Psi_{rq}]^T; \quad \mathbf{R} = \text{diag}\{R_s \quad R_s \quad R_r \quad R_r\},$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{L}^{-1}\Psi; \quad L_s = L_m + L_{\sigma}; \quad L_r = L_m + L_{\sigma r}; \quad L_m = \frac{\Psi_0}{I_0}, \quad (1)$$

$$I_0 = \sqrt{(i_d + i_{rd})^2 + (i_q + i_{rq})^2}; \quad \Psi_0 = \sqrt{(\Psi_d - L_{\sigma} i_d)^2 + (\Psi_q - L_{\sigma} i_q)^2}.$$

Поскольку рассматривается обобщенная машина, отношение потоко-сцепления в воздушном зазоре Ψ_0 к току намагничивания I_0 принято в виде постоянной величины. Для анализа связей силовых и энергетических характеристик рассмотрены процессы электромеханического преобразования энергии. Эти процессы неразрывно связаны с накоплением энергии в обмотках двигателя (энергией магнитного поля) и описываются уравнением (2) балан-са P мощности всех цепей управления:

$$P = \mathbf{I}^T \mathbf{R} \mathbf{I} + \omega \mathbf{I}^T \mathbf{D} \Psi + \mathbf{I}^T \frac{d\Psi}{dt} = \Delta P + \omega m + \frac{dw}{dt}; \quad (2)$$

$$w = \frac{1}{2} \Psi^T \mathbf{I}; \quad m = \mathbf{I}^T \mathbf{D} \Psi; \quad (3)$$

$$f(\beta, \varphi) = \frac{2w}{m} = \frac{1}{(\text{ctg } \beta + \text{tg } \varphi)} \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \frac{L_r L_s}{L_m^2 \sin^2 \beta} - 2 + 2 \text{tg } \varphi \text{ctg } \beta \right),$$

$$F(\varphi, \beta) = \frac{\Delta P}{m}; \quad F(\beta, \varphi) = \frac{1}{(\text{ctg } \beta + \text{tg } \varphi)} \left(\frac{R_s}{L_s \cos^2 \varphi} + \frac{R_r}{L_m^2 \sin^2 \beta} \right), \quad (4)$$

$$f_u(\beta, \varphi) = \frac{U^2}{R_s m} = \frac{\text{tg } \varphi^2 + [1 + \omega T_s (\text{ctg } \beta + \text{tg } \varphi)]^2}{T_s (\text{ctg } \beta + \text{tg } \varphi)}.$$

Из уравнения (2) следует, что состояние электрической машины зависит от четырех независимых переменных. В качестве независимых переменных могут выступать: m – электромагнитный момент, ω – угловая скорость вращения ротора, β и φ – два аргумента на рис. 1, которых достаточно для определения положения всех векторов. Из числа приведенных переменных m и ω заданы условиями технологической задачи. Варьируемыми величинами выбраны аргументы β и φ , с помощью которых осуществляется поиск эффективного управления электроприводом. Связи силовых и энергетических характеристик электрической машины для каждого положения векторов представлены в виде трех функций энергетического состояния (4). Используя установленные связи, определено влияние аргументов на характер процессов электромеханического преобразования энергии [9]. Определены показатели качества (рис. 2), характеризующие основные свойства электропривода. Здесь показатель времени T_d характеризует интенсивность процессов электромеханического преобразования энергии, η – показатель энергетической эффек-

тивности, U_0 – показатель эффективности использования напряжения, $\cos(\varphi)$ – показатель эффективности использования мощности.

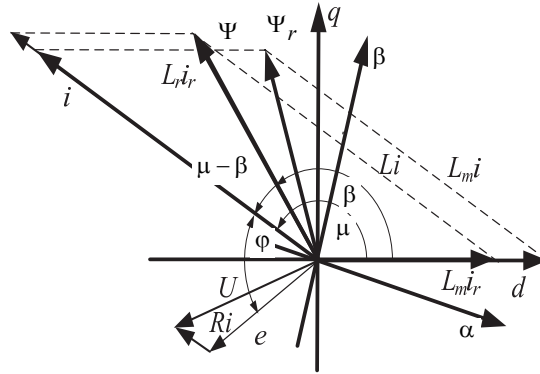


Рис. 1. Векторная диаграмма

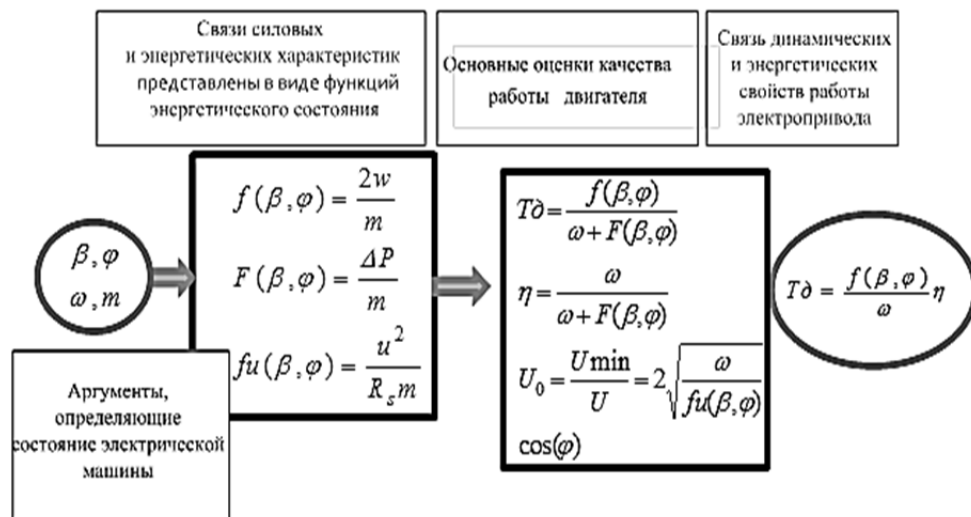


Рис. 2. Связи основных свойств электропривода

Использование явных связей основных свойств электропривода позволило установить правило выбора показателей качества многокритериальной оптимизации. Задавая один показатель качества, всегда можно определить значения аргументов β и φ , при которых другие показатели имеют наилучшее значение. Установленные правила позволяют формализовать задачу эффективного использования электрической машины и источника питания для достижения цели управления, определенной технологическими требованиями [10].

4. МНОГОМЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Для реализации решений многокритериальной задачи управления электрическая машина рассматривается в виде многомерного объекта, имеющего несколько входов и выходов, нелинейно связанных с регулируемыми пере-

менными. Для исключения нелинейной связи регулируемых переменных и выходных величин, синтез многомерного управления осуществляется методом обратной модели с линеаризацией по выходу (Linearization by output injection) [11]. Преобразовав уравнение (1), выполнен переход к системе новых регулируемых переменных $\tilde{\Psi}$. В силу простого математического описания, в качестве регуляторов выходных величин рассматриваются П - регуляторы.

$$\frac{d\Psi}{dt} = \mathbf{V}\Psi + \mathbf{U}; \quad \mathbf{V} = -\mathbf{R}\mathbf{L}^{-1} + \omega\mathbf{D}; \quad \Psi = \mathbf{B}\psi; \quad \psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2}; \quad (5)$$

$$\mathbf{B}^T = |b_d \quad b_q \quad b_{rd} \quad b_{rq}|; \quad \left\{ \sum_{i=1}^n u_i^2 \leq u_{ogr}^2 \right\} \subset \Omega; \quad i = \overline{1, n} \quad (n=4), \quad (6)$$

где $b_d = \cos(\beta)$; $b_q = \sin(\beta)$; $b_{rq} = \frac{L_m \sin(\beta)}{L_s}$,

$$b_{rd} = \frac{\cos(\beta) \left[(L_r L_s - L_m^2) \operatorname{tg}(\beta)^2 + L_m^2 \operatorname{tg}(\beta) \operatorname{tg}(\varphi) + L_r L_s \right]}{L_m L_s (\operatorname{tg}(\beta) \operatorname{tg}(\varphi) + 1)};$$

$$\mathbf{U} = -\mathbf{K}\Psi + \Psi_{ref} T_z^{-1}; \quad \Psi_{ref} = \mathbf{B}_{ref} \frac{L_s [\operatorname{ctg}(\beta) + \operatorname{tg}(\varphi)]}{\psi} U_{ref}, \quad (7)$$

$$\psi \tilde{\mathbf{B}} \frac{d\Psi}{dt} = \psi \tilde{\mathbf{B}} (\mathbf{V} - \mathbf{K}) \Psi + \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{B}_{ref} \frac{\operatorname{ctg}(\beta) + \operatorname{tg}(\varphi)}{T_z} L_s U_{ref},$$

где $\tilde{\mathbf{B}} = \operatorname{diag}\{b_d, b_q, b_{rd}, b_{rq}\}$; $\psi \tilde{\mathbf{B}} \Psi = \tilde{\Psi}$; $\tilde{\Psi}^T = |\Psi_d^2 \quad \Psi_q^2 \quad \Psi_{rd}^2 \quad \Psi_{rq}^2|$;

$$\frac{d\tilde{\Psi}}{dt} = 2(\mathbf{V} - \mathbf{K})\tilde{\Psi} + 2\tilde{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{ref} \frac{\operatorname{ctg}(\beta) + \operatorname{tg}(\varphi)}{T_z} L_s U_{ref}. \quad (8)$$

Вектор напряжения \mathbf{U} ограничен по модулю u_{ogr} и сформирован таким образом (7), чтобы в совокупности с обратными связями по регулируемым переменным Ψ в области допустимых управлений он отражал задание U_{ref} электромагнитного момента и задание основных свойств электропривода с помощью матрицы \mathbf{B}_{ref} . Под областью допустимых управлений понимаются все возможные управления, позволяющие сформировать предписанные значения выходных величин. Следует определить элементы матрицы \mathbf{K} регулятора управления, при котором состояние электрической машины в условиях ограничения полосы пропускания контуров регулируемых переменных на уровне T_z^{-1} будет изменяться за минимальное время [12].

5. ЗАДАЧА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Для решения задачи быстрогодействия применен метод Лагранжа в понтрягинской форме [13]. Связь (9) между оптимальным управлением, регулируемыими переменными и координатами вектора сопряженной системы определена посредством гамильтониана H быстрогодействия [14]:

$$\frac{d\tilde{\Psi}}{dt} = \mathbf{f}(\tilde{\Psi}, \tilde{\mathbf{B}}, U_{ref}), \quad H = \mathbf{S}^T \mathbf{f}(\tilde{\Psi}, \tilde{\mathbf{B}}, U_{ref}), \quad T = \int_{t_0}^{t_1} 1 dt \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$\mathbf{f}(\tilde{\Psi}, \tilde{\mathbf{B}}, U_{ref}) = 2(\mathbf{V} - \mathbf{K})\tilde{\Psi} + 2\tilde{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{ref} \frac{\text{ctg}\beta + \text{tg}\varphi}{T_z} L_s U_{ref}; \quad \tilde{\Psi}(0) = 0; \quad (10)$$

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \tilde{\Psi}} = -2(\mathbf{V} - \mathbf{K})^T \mathbf{S}, \quad \mathbf{S}(t) = e^{-2(\mathbf{V} - \mathbf{K})^T t} \mathbf{S}(0); \quad (11)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tilde{\mathbf{B}}} = 0; \quad \frac{\partial H}{\partial U_{ref}} = 2\mathbf{S}^T \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{ref} \frac{L_s [\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)]}{T_z} = 0; \quad (12)$$

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{S}(0)e^{\frac{2t}{T_z}}, \quad \frac{d\mathbf{S}}{dt} = \frac{2}{T_z} \mathbf{S}, \quad \mathbf{K} = \mathbf{E}T_z^{-1} + \mathbf{V}; \quad (13)$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \text{diag}\{b_d, b_q, b_{rd}, b_{rq}\}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \text{const}, \quad \mathbf{B} = \text{const} = \mathbf{B}_{ref},$$

$$\frac{d\tilde{\Psi}}{dt} = -2\frac{\tilde{\Psi}}{T_z} + 2\tilde{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{ref} \frac{\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)}{T_z} L_s U_{ref}; \quad (14)$$

$$\tilde{\Psi}(t) = e^{-2tT_z^{-1}} \tilde{\Psi}(0) + \int_0^t 2e^{2T_z^{-1}(t-\tau)} \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{ref} \frac{\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)}{T_z} L_s u_{ref} d\tau. \quad (15)$$

$$\psi^2(t) = U_{ref} L_s [\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)] \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_z}} \right);$$

$$\Psi(t) = \mathbf{B}\psi(t) = \mathbf{B} \sqrt{U_{ref} L_s [\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)] \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_z}} \right)}; \quad m = U_{ref} \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_z}} \right). \quad (16)$$

В результате формализации задачи управления выбраны аргументы β и φ , значения которых используются для задания основных свойств электропривода посредством элементов (6) матрицы \mathbf{B}_{ref} . Критерием качества является время T (9). Вектор \mathbf{S} сопряженной системы (11) имеет довольно сложную зависимость от времени. Из условий стационарности (12) следует, что изменение составляющих вектора сопряженной системы должно осуществляться пропорционально и с одинаковым темпом. Эти требования мо-

гут быть выполнены при определенном выборе (13) элементов матрицы **K** регулятора. Определенный выбор элементов матрицы **K** регулятора влияет и на решение (15) основной системы (14) уравнений, которое удалось получить в аналитическом виде для регулируемых переменных (16). Из полученных выражений следует, для основной системы уравнений заданное соотношение регулируемых переменных сохраняется как в статических, так и динамических режимах, обеспечивая типовой характер формирования электромагнитного момента при одновременном регулировании заданных свойств электропривода. Быстродействие системы в условиях ограничения полосы пропускания контуров регулируемых переменных в два раза выше относительно одноканальной структуры управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью рассматриваемого решения задачи управления является представление электрической машины в виде многомерного объекта, имеющего несколько входов и выходов, нелинейно связанных с регулируемыми переменными. Показан выбор аргументов и установлен перечень показателей качества, характеризующих динамические и энергетические свойства электропривода в зависимости от выбранных аргументов, определяющих закон управления. Установленные связи основных свойств электрической машины позволили разработать правило многокритериальной оптимизации электропривода. Разработанные правила позволяют формализовать задачу многокритериального управления, учитывая потери в стали и насыщение магнитной системы двигателя. Использование вариационных методов позволило определить условия управления, обеспечивающие изменения состояния обобщенной электрической машины за минимальное время в условиях установленных ограничений. За счет применения метода обратной модели с линеаризацией по выходу управление обеспечивает типовой характер формирования выходных величин. Типовой характер формирования электромагнитного момента определяет прогнозируемость процессов управления и преемственность синтеза внешних контуров способами подчиненного регулирования. Предложенная методология синтеза управления электроприводом способствует решению практически важных задач энергосбережения высокودинамичных систем воспроизведения движения большой и малой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Н.Ф., Горнов А.О. Критерии эффективности процесса электрохимического преобразования энергии в силовом канале электропривода. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 543 с.
2. Саати Т.Л. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы. – М.: Мир, 1973. – 302 с.
3. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Обобщение задач оптимизации установившихся режимов электрических двигателей // Труды международной тринадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – С. 15–18.
4. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03. – Екатеринбург, 2009. – 495 с.
5. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Экстремальное управление электрическими. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 420 с.

6. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. – М: Энергия, 1964. – 527 с.
7. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
8. Семькина И.Ю. Повышение энерго и ресурсоэффективности горных машин средствами регулируемого электропривода: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03. – Кемерово, 2013. – 312 с.
9. Симаков Г.М., Филушов Ю.П. Энергоэффективное управление электроприводом переменного тока. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 245 с.
10. Филушов Ю.П. Синтез структуры управления синхронным двигателем в системе его физических переменных, обеспечивающий минимум реактивных потерь // Труды Всероссийской научно-технической конференции по повышению эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск, 1994. – С. 23–27.
11. Воевода А.А., Филушов Ю.П. Линеаризация обратной связью // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 68–76.
12. Воевода А.А., Филушов Ю.П. Синтез алгоритма управления многоканальным объектом // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 61. – С. 88–95.
13. Филушов Ю.П., Филушов В.Ю. Управление асинхронной машиной в условиях минимума реактивной мощности // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 15–20.
14. Алексеев В.М., Тихомиров С.В. Оптимальное управление. – М.: Наука, 1979. – 430 с.

Востриков Анатолий Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления. Имеет более 150 публикаций. E-mail: sch@sintez.nstu.ru

Прохоренко Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез систем управления. Имеет более 30 публикаций, в том числе 5 патентов. E-mail: prokhorenko@corp.nstu.ru

Филушов Юрий Петрович, кандидат технических наук, инженер ФГУП ПО «Север». Основное направление научных исследований – теория автоматического управления, оптимизация электромагнитных процессов в электрической машине. Имеет более 50 публикаций. E-mail: filushov@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-39-50

Multicriteria synthesis of multidimensional control of the AC electric drive*

A.S. VOSTRIKOV¹, E.V. PROKHORENKO², Yu.P. FILYUSHOV³

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: vostrikov@nstu.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; PhD (Eng.), associate professor. E-mail: prokhorenko@corp.nstu.ru*

³ *Federal State Unitary Enterprise "Sever", 1A, Ob'edineniya St., Novosibirsk, 630092, Russian Federation; PhD (Eng.), engineer. E-mail: filushov@mail.ru*

The arguments are defined based on which analytic relationship of power and power characteristics of the alternating current drive in the form of three functions of the energy state are established. These characteristics include electromagnetic torque, magnetic field energy, heat loss and voltage. Using the energy state functions by means of quality indices the relationships between the main properties of the AC drive are established taking into account the amount of reactive power, loss in steel, loss in copper, saturation of the engine magnetic system, the power of instantaneous change in the magnetic field energy in the formation of the

* Received 13 August 2017.

electromagnetic moment as well as the efficiency of using power and voltage fed to the engine windings. Depending on technological requirements, a rule for choosing solutions for multicriteria optimization of the electric drive is developed. The developed rule allows formalizing the problem of multicriteria control taking into account losses in steel and saturation of the engine magnetic system. Power efficiency, the intensity of processes of electromechanical energy transformation, the efficiency of using power and voltage fed to the engine windings serve as quality indices. The method of inverse model with output linearization is used to form multidimensional control of the electric drive, which allows changing output values in the velocity function, current or saturation of the engine magnetic system. The energetic properties of the electric drive along with the electromagnetic torque act as output values. Using variational methods, control conditions are determined that ensure the change in the state of the electric machine in a minimum time given the restrictions. The proposed methodology of control synthesis contributes to the solution of practically important problems of energy saving of highly dynamic systems of reproduction of high and low power motion.

Keywords: AC electric drive, quality criteria, multicriteria optimization, multidimensional management, quality metrics, Lagrange method in the Pontryagin form, criterion of performance quality, inverse model with output linearization, typical change of output values

REFERENCES

11. Il'inskii N.F., Gornov A.O. Kriterii effektivnosti protsessa elektrokhimicheskogo preobrazovaniya energii v silovom kanale elektroprivoda. Avtomatizirovannyi elektroprivod [Criteria of efficiency of process of electrochemical transformation of energy in the power channel of the electric drive. Automated electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 543 p.
2. Saaty T.L. *Optimization in integers and related extremal problems*. New York, McGraw-Hill, 1970 (Russ. ed.: Saati T.L. *Tselochislennyye metody optimizatsii i svyazannyye s nimi ekstremal'nye problemy*. Moscow, Mir Publ., 1973. 302 p.).
3. Polyakov V.N., Shreiner R.T. [Generalization of optimization problems of steady-state modes of electric motors]. *Trudy mezhdunarodnoi trinatstsatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka"* [Proceedings of the thirteenth international scientific-technical conference "Alternating current electrical drives"]. Ekaterinburg, 2005, pp. 15–18. (In Russian).
4. Polyakov V.N. *Energoeffektivnyye rezhimy reguliruemyykh elektroprivodov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Energy efficient modes of regulated electric drives. Dr. eng. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2009. 495 p.
5. Polyakov V.N., Shreiner R.T. *Ekstremal'noe upravlenie elektricheskimi dvigatelyami* [Extreme control of electric engines]. Ekaterinburg: UGTU-UPI Publ., 2006. 420 p.
6. White D.C., Woodson H.H. *Electromechanical energy conversion*. New York, Wiley, 1959 (Russ. ed.: Uait D., Vudson G. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii*. Moscow, Energiya Publ., 1964. 527 p.).
7. Krasovskii A.A. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p.
8. Semykina I.Yu. *Povyshenie energo i resursoeffektivnosti gornyykh mashin sredstvami reguliruemogo elektroprivoda*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Increase of power and resource efficiency of mining machines by means of the regulated electric drive. Dr. eng. sci. diss.]. Kemerovo, 2013. 312 p.
9. Simakov G.M., Filyushov Yu.P. *Energoeffektivnoe upravlenie elektroprivodom peremennogo toka* [Energy efficient control of AC electric drive]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 245 p.
10. Filyushov Yu.P. [Synthesis of synchronous motor control in the system of physical variables, providing a minimum reactive losses]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po povysheniyu effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri* [Proceedings of All-Russian scientific-technical conference on increasing the efficiency of production and use of energy in Siberia]. Irkutsk, 1994, pp. 23–27. (In Russian).
11. Voevoda A.A., Filyushov Yu.P. 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.
12. Voevoda A.A., Filyushov Yu.P. Sintez algoritma upravleniya mnogokanal'nym ob'ektom [Multi-channel object control algorithm synthesis]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-*

tehnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University, 2017, no. 61, pp. 88–95.

13. Filyushov Yu.P., Filyushov V.Yu. Upravlenie asinkhronnoi mashinoi v usloviyakh minimuma reaktivnoi moshchnosti [Control of an asynchronous machine under conditions of minimum reactive power]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 2, pp. 15–20. (In Russian).

14. Alekseev V.M., Tikhomirov S.V. *Optimal'noe upravlenie* [Optimal control]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 430 p.

Для цитирования:

Востриков А.С., Прохоренко Е.В., Филлюшов Ю.П. Многокритериальный синтез многомерного управления электроприводом переменного тока // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 39–50. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-39-50.

For citation:

Vostrikov A.S., Prokhorenko E.V., Filyushov Yu.P. *Mnogokriterial'nyi sintez mnogomernogo upravleniya elektroprivodom peremennogo toka* [Multicriteria synthesis of multidimensional control of the AC electric drive]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 39–50. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-39-50.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 621.865.8+62-503.53

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-51-66

Мультиагентное управление механизмом параллельной структуры на основе декомпозирующего подхода*

**А.Р. ГАЙДУК¹, С.Г. КАПУСТЯН², Е.А. ПЛАКСИЕНКО³,
К.В. КОЛОКОЛОВА⁴**

¹ 347922, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет; 357700, РФ, г. Кисловодск, пр. Победы, 37а, Кисловодский гуманитарно-технический институт, доктор технических наук, профессор. E-mail: gaiduk_2003@mail.ru

² 347928, РФ, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, ЮНЦ РАН, ведущий научный сотрудник; НИИ МВС им. академика А.В. Каляева ЮФУ, зав. отделом, доктор технических наук. E-mail: kap56@mail.ru

³ 347900, РФ, г. Таганрог, ул. Петровская, 45, Таганрогский институт управления и экономики, доцент. E-mail: putkad@mail.ru

⁴ 347922, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет, ассистент. E-mail: kbesklubova@mail.ru

В последние годы вместо манипуляторов консольного типа все чаще применяются механизмы параллельной структуры. Эти механизмы позволяют достигать более высоких скоростей, ускорений и точности движений рабочих инструментов, обусловленных такими технологическими операциями, как раскрой и лазерная резка листовых материалов, сборка, сварка и другие. В связи с этим задача разработки методов синтеза соответствующих управлений становится весьма актуальной. Известные методы синтеза приводят к достаточно сложным системам управления как в плане их синтеза, так и в плане реализации. Одним из наиболее сложных моментов, особенно при синтезе управлений, оптимальных в смысле квадратичных критериев, является учет ограниченности рабочей области механизмов параллельной структуры. Ниже предлагается метод синтеза мультиагентного управления механизмами параллельной структуры на примере управления триподом. Законы и алгоритмы управления строятся на основе декомпозирующего подхода и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ). Применение этого аналитического метода позволяет создавать мультиагентные системы управления механизмами параллельной структуры с необходимыми показателями качества в переходном и в установившемся режиме. В данной работе используется известная математическая модель трипода. Показано, что желаемые траектории движений рабочих инструментов целесообразно формировать исходя из операций, обуслов-

* Статья получена 22 сентября 2017 г.

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

ленных назначением разрабатываемого манипулятора. Эффективность предложенного подхода подтверждается результатами компьютерного моделирования.

Разработанный подход может применяться для создания мультиагентных манипуляторов с механизмами параллельной структуры для решения широкого круга задач: внесения удобрений, осуществления экологических наблюдений, повышения качества систем технического зрения, выполнения многих производственных технологических операций.

Ключевые слова: манипулятор консольный, механизм параллельной структуры, трипод, траектория, управление, система, синтез, декомпозирующий подход, управление по выходу и воздействиям

ВВЕДЕНИЕ

Роботы с последовательной кинематической схемой манипуляторов (консольного типа) достаточно часто применяются при автоматизации промышленных производств, особенно серийного характера [1–3]. Однако они могут применяться и для других целей. Так, в работе [4] исследуются особенности конструкции, структуры и систем управления лазер-роботов; в [5] показана целесообразность применения роботизированных комплексов для внесения удобрений. Информационная система таких комплексов может одновременно учитывать редукцию нитратов почвы, вариабельность внутрипольных контуров и легкоподвижных форм азота, фосфора и калия, а также экологическую пластичность растений по отношению к плодородию почвы, что позволит существенно повысить эффективность сельскохозяйственного производства. Робототехнические комплексы находят применение при экологических наблюдениях [6] и решении многих других задач.

Роботы, имеющие манипуляторы консольного типа, обладают рядом достоинств, однако они не позволяют осуществлять перемещение больших масс, особенно на больших скоростях, и обеспечивать позиционирование с высокой точностью. Это обусловлено пониженной жесткостью манипуляторов консольной конструкции, поэтому для получения требуемых качественных характеристик приходится существенно увеличивать массу плеч манипулятора и, соответственно, мощность приводов. В связи с этим в последнее время все шире применяются манипуляторы параллельной структуры [7–11]. Такие манипуляторы обладают лучшей грузоподъемностью и повышенной жесткостью, позволяют достигать более высоких скоростей, ускорений и точности перемещения рабочих инструментов. Например, в работе [11] предлагается в оптических системах технического зрения вместо консольных роботов применять механизмы параллельной структуры на основе пьезоэлектрических актуаторов. Это позволяет повысить компактность, жесткость, быстродействие и точность манипуляторов трехмерных систем стабилизации оптических приборов.

Обычно манипуляторы параллельной структуры применяются для обеспечения пространственных поступательных или вращательных движений схвата, в котором помещается рабочий инструмент. Движения таких типов необходимы при выполнении многих технологических операций, таких как раскрой и лазерная резка листовых материалов, сборка, сварка и др. [1–3, 7].

Кинематическая схема механизмов параллельной структуры (МПС) несколько сложнее схемы манипуляторов консольной конструкции, что обусловлено наличием нескольких взаимосвязанных, параллельных кинематических звеньев. Множественность параллельных звеньев осложняет решение

задачи управления движениями МПС, но согласованное управление этими кинематическими звеньями дает возможность реализовать достаточно сложные пространственные движения схвата [7, 9–11]. Практически для управления МПС необходимо синтезировать многомерную систему автоматического управления (МСАУ), так как этот механизм по сути является многоканальным объектом со взаимосвязанными каналами [12, 13].

Синтез систем управления пространственными движениями схвата МПС рассматривалась во многих работах [13–20] и др. Чаще всего при этом используются системы оптимального управления [11, 14, 15]. Весьма эффективным является применение принципов стайного управления, а также сетцентрического и мультиагентного подходов [18–20]. Мультиагентный подход приводит к декомпозиции [13] задачи управления МПС на несколько одноканальных задач. Каждая из них решается параллельно соответствующим интеллектуальным агентом, но с учетом необходимых взаимосвязей. Математические модели МПС обычно являются динамическими и представляют собою системы нелинейных дифференциальных уравнений весьма высоких порядков [6, 7, 14].

В данной работе рассматривается задача аналитического синтеза мультиагентной системы автоматического управления (МСАУ) механизмом параллельной структуры на основе трипода. Применение совокупности нескольких агентов, позволяет существенно упростить синтез системы управления триподом и ее практическую реализацию. Основной задачей работы является разработка алгоритмов функционирования агентов, которая осуществляется на основе декомпозирующего управления и метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АСС с УВВ) [12, 13, 21, 22].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Конструкция трипода, используемого в рассматриваемом манипуляторе, полностью аналогична конструкции трипода, показанного на рис. 1, который взят из работы [14]. Трипод имеет основание в виде равнобедренного треугольника 5. К нему на шарнирах крепятся три звена 1, 2, 3, концы которых связаны между собой в точке 6 специальным пятиподвижным шарнирным узлом. К этому шарниру крепится схват с рабочим инструментом. Каждое звено 1, 2, 3, а также 4 представляет собою пару «ходовой винт–гайка», поэтому при вращении винта электродвигателем постоянного тока изменяется длина звена. При этом схват совершает необходимые технологические движения в пределах рабочей зоны, размеры которой определяются минимальными и максимальными длинами звеньев.

Для увеличения рабочей зоны может изменяться угол наклона основания 5 за счет изменения длины звена 4. Фактически каждая пара «винт–гайка» и электродвигатель являются исполнительным механизмом, а напряжения, формируемые соответствующим агентом и подаваемые на двигателя звеньев 1, 2 и 3, являются управлениями рассматриваемого в данной работе манипулятора. Длина звена 4 изменяется при необходимости увеличения рабочей зоны манипулятора, но в данном случае является фиксированной.

На рис. 2 приведена кинематическая схема трипода и принятая система координат $Oxyz$ [8, 14]. Точка в середине стороны ВС треугольного основания ABC является началом системы координат. Ось Ox направлена вправо,

ось Oy – параллельно продольной оси манипулятора и робота, а ось Oz – вертикально вверх. Основание ABC поворачивается вокруг стороны BC за счет изменения величины l_4 , т. е. длины звена 4. При этом изменяется угол φ – угол наклона основания ABC по отношению к вертикали.

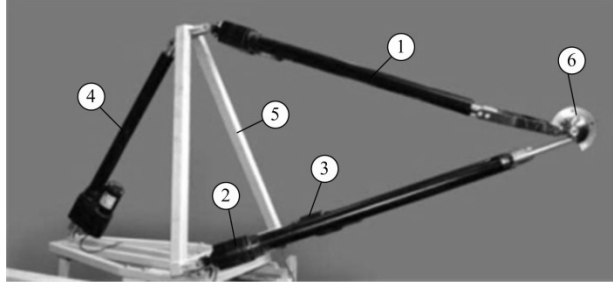


Рис. 1. Трипод манипулятора

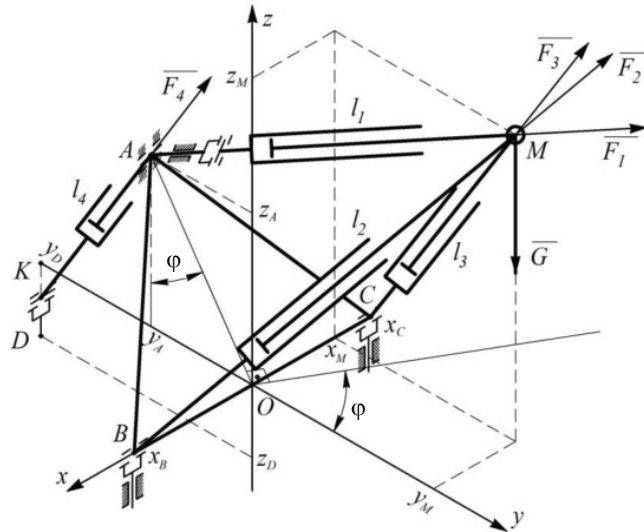


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора-трипода

Так как схват крепится в точке M , то его положение определяется координатами именно этой точки, которая перемещается в рабочем пространстве трипода за счет изменения длин l_1, l_2, l_3 управляемых звеньев $1, 2, 3$. Обозначим координаты этой точки следующим образом: $x_M = x_1(t)$, $y_M = x_3(t)$ и $z_M = x_5(t)$. Тогда они будут связаны с длинами l_1, l_2, l_3 управляемых звеньев $1, 2, 3$ формулами

$$l_1 = \sqrt{x_1^2 + (x_3 + a)^2 + (x_5 - c)^2}, \quad l_2 = \sqrt{(x_1 - b)^2 + x_3^2 + x_5^2},$$

$$l_3 = \sqrt{(x_1 + b)^2 + x_3^2 + x_5^2},$$
(1)

где $a = OA \sin \varphi$, $b = OB$, $c = OA \cos \varphi$; OA, OB – геометрические параметры основания манипулятора и точек его крепления на поворотном основании (рис. 2).

Математическая модель трипода, полученная, в частности, в работах [8, 14] на основе уравнений Лагранжа с неопределенными множителями, при $\varphi = \text{const}$ описывается системой следующих дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = \frac{F_1}{ml_1}x_1 + \frac{F_2}{ml_2}(x_1 - x_B) + \frac{F_3}{ml_3}(x_1 + x_B); \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad \dot{x}_4 = \frac{F_1}{ml_1}(x_3 + d_3) + \frac{F_2}{ml_2}x_3 + \frac{F_3}{ml_3}x_3; \quad (3)$$

$$\dot{x}_5 = x_6, \quad \dot{x}_6 = \frac{F_1}{ml_1}(x_5 - d_5) + \frac{F_2}{ml_2}x_5 + \frac{F_3}{ml_3}x_5 - g; \quad (4)$$

$$y = [x_1 \ x_3 \ x_5]^T = [x_M \ y_M \ z_M]^T. \quad (5)$$

В уравнениях (1)–(5) $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$ – вектор состояния; $F = F(t) = [F_1(t) F_2(t) F_3(t)]$ – вектор управляющих усилий, создаваемых соответствующими электроприводами трипода; g – ускорение свободного падения.

Отметим, что в выражениях (1)–(5) переменные $x_1 = x_M$, $x_3 = y_M$, $x_5 = z_M$ являются координатами точки схвата M , а переменные x_2 , x_4 , x_6 – соответственно проекциями скорости этой точки на оси координат Ox , Oy , Oz [14]. Таким образом, используемый в рассматриваемом манипуляторе трипод является динамической системой 6-го порядка.

Задача синтеза мультиагентного управления заключается в построении алгоритмов функционирования агентов, которые управляют изменением длин l_1 , l_2 , l_3 управляющих звеньев. При этом должны учитываться ограничения на допустимые изменения указанных длин, которые имеют вид

$$l_{\min,i} \leq l_i \leq l_{\max,i}, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (6)$$

где $l_{\min,i}$ и $l_{\max,i}$ – минимально и максимально возможные значения длин управляющих звеньев трипода, которые обусловлены конструкцией последних.

2. ДЕКОМПОЗИЦИЯ МОДЕЛИ ТРИПОДА

Чтобы упростить решение задачи, воспользуемся декомпозирующим подходом [12, 13], который позволяет преобразовать многоканальную задачу (1)–(6) в ряд одноканальных задач управления. С этой целью введем два новых вектора \tilde{x}_I и \tilde{x}_{II} следующим образом: $\tilde{x}_I = [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2 \ \tilde{x}_3] = [x_1 \ x_3 \ x_5]$; $\tilde{x}_{II} = [\tilde{x}_4 \ \tilde{x}_5 \ \tilde{x}_6] = [x_2 \ x_4 \ x_6]$. Тогда уравнения (2)–(5) примут вид

$$\dot{\tilde{x}}_I = E\tilde{x}_{II}, \quad \dot{\tilde{x}}_{II} = B(\tilde{x})F + e_3 g, \quad (7)$$

где E и e_3 – единичная 3×3 -матрица и ее 3-й столбец; вектор $F = [F_1 \ F_2 \ F_3]^T$, а матрица

$$B(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{x}_1}{ml_1} & \frac{\tilde{x}_1 - x_B}{ml_2} & \frac{\tilde{x}_1 + x_B}{ml_3} \\ \frac{\tilde{x}_2 + d_3}{ml_1} & \frac{\tilde{x}_2}{ml_2} & \frac{\tilde{x}_2}{ml_3} \\ \frac{\tilde{x}_3 - d_5}{ml_1} & \frac{\tilde{x}_3}{ml_2} & \frac{\tilde{x}_3}{ml_3} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Как показано в работе [12], задача декомпозиции системы (7) имеет решение, если только определитель матрицы $B(\tilde{x})$ (8) не равен нулю. В данном случае на основе выражения (8) имеем

$$\det B(\tilde{x}) = \frac{2x_B(d_3\tilde{x}_3 + d_5\tilde{x}_2)}{m^3 l_1 l_2 l_3} = D_B(\tilde{x}). \quad (9)$$

Так как $x_B \neq 0$ (см. рис. 2), то условие $\det B(\tilde{x}) \neq 0$, очевидно, выполняется, если

$$d_3\tilde{x}_3 + d_5\tilde{x}_2 = d_3x_5 + d_5x_3 = OA(z_M \sin\varphi + y_M \cos\varphi) \neq 0. \quad (10)$$

Не трудно видеть, что неравенство (10) всегда может быть выполнено путем соответствующего изменения угла φ , поэтому далее будем считать, что это условие выполнено. Таким образом, условие (10) обеспечивает существование решения задачи декомпозиции математической модели рассматриваемого трипода (см. рис. 1). Решение этой задачи можно получить на основе декомпозирующего подхода, предложенного в работе [12], в соответствии с которым в случае системы (7) управление

$$F = \frac{1}{D_B(\tilde{x})} \text{adj} B(\tilde{x}) v, \quad (11)$$

где $v = [v_1 \ v_2 \ \tilde{v}_3]^T$ – вектор управления; $\text{adj} B$ – обозначение присоединенной матрицы. Отметим, что существование управления (11) гарантируется условием (10).

Подставив выражение (11) в уравнение (7), с учетом известного свойства присоединенной матрицы $B \text{adj} B = E \det B$ [12] и обозначения (9) получим уравнения

$$\dot{\tilde{x}}_I = E\tilde{x}_{II}, \quad \dot{\tilde{x}}_{II} = Ev + e_3 g. \quad (12)$$

Принимая во внимание вектор $v = [v_1 \ v_2 \ \tilde{v}_3]^T$ и возвращаясь к исходным переменным x_i , $i = \overline{1, 3}$, запишем систему уравнений (12) следующим образом:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = v_1, \quad \dot{x}_3 = x_4, \quad \dot{x}_4 = v_2, \quad \dot{x}_5 = x_6, \quad \dot{x}_6 = \tilde{v}_3 - g. \quad (13)$$

Далее введем три новых вектора состояния w_1, w_2, w_3 , полагая

$$w_1 = [x_1 \ x_2]^T, \quad w_2 = [x_3 \ x_4]^T, \quad w_3 = [x_5 \ x_6]^T. \quad (14)$$

С учетом обозначений (17) в векторно-матричной форме системы уравнений (16) записываются таким образом:

$$\begin{aligned} \dot{w}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_1, & \dot{w}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2, \\ \dot{w}_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tilde{v}_3 - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} g. \end{aligned} \quad (15)$$

Третья система (15) отличается от первых двух наличием постоянного по величине возмущения, равного g . Для получения аналогичных структур всех систем (15) введем новое управление v_3 , полагая

$$\tilde{v}_3 = v_3 + g. \quad (16)$$

С учетом выражения (16) все три уравнения (15) записываются следующим образом:

$$\dot{w}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} w_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (17)$$

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

3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

По отношению к уравнениям (17) задача синтеза заключается в определении законов изменения во времени управлений $v_i = v_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, т. е. алгоритмов действий агентов при осуществлении ими управления триподом. Как показывает анализ работ, посвященных управлению триподом, чаще всего ставится задача оптимального управления, которая заключается в переводе точки M из произвольного начального состояния $\tilde{x}_{I0} = [x_{M0} \ y_{M0} \ z_{M0}]$, $\tilde{x}_{II0} = 0$ в заданное конечное состояние $\tilde{x}_{I1} = [x_{M1} \ y_{M1} \ z_{M1}]$, $\tilde{x}_{II1} = 0$. При этом процесс перехода трипода должен проходить так, чтобы некоторый квадратичный критерий качества имел минимальное значение при выполнении ограничений (6) и (10) [8, 14, 15].

Для решения задачи оптимизации в нашем случае перейдем к уравнениям в отклонениях. Пусть $z_i(t) = w_i(t) - w_{i0}$ – отклонения векторов состояния, а $u_i(t) = v_i(t) - v_{i0}$ – отклонения управлений, $i = 1, 2, 3$. Так как системы (17)

являются линейными, то их уравнения в отклонениях совпадают с уравнениями (17), т. е.

$$\dot{z}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (18)$$

Применительно к системам (18) задача управления состоит в переводе каждой из этих систем из заданных начальных состояний $[w_{i0} \ 0]^T \neq 0$ в заданные конечные состояния $[w_{i1} \ 0]^T \neq 0$, т. е. в конечные состояния $z_{i1} = [z_{i1} \ 0]^T = 0$, так чтобы выполнялись условия

$$J_i = \int_0^\infty [z_i^T Q_i z_i + r_i u_i^2] dt \rightarrow \min_{u_i} \quad \text{при} \quad Q_i = \begin{bmatrix} q_{i1} & 0 \\ 0 & q_{i2} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (19)$$

с учетом ограничений (6) и (11). С этой целью управления u_i в (18), обеспечивающие выполнение условия (19), имеют вид

$$u_i^\circ = \gamma_i (g_i - k_{i1}^\circ z_{i1} - k_{i2}^\circ z_{i2}) = \gamma_i (g_i - k_i^{\circ T} z_i). \quad (20)$$

Здесь g_i – заданные значения изменения переменных w_{i1} $i = 1, 2, 3$. Значения коэффициентов k_i вектора k° из (20) определяются решением соответствующего уравнения Риккати, а коэффициенты – $\gamma_i = k_{i1}^\circ$. Эти значения γ_i выбираются из условий равенства нулю коэффициентов ошибки C_{i0} по задающим воздействиям g_i синтезируемых систем (18) и (20) [22, 23].

Так как уравнения (18) имеют каноническую управляемую форму, а их характеристические уравнения имеют вид $p^2 = 0$ при всех $i = 1, 2, 3$, то, следуя [23], легко установить, что оптимальные векторы k_i° в выражениях (20) определяются выражениями

$$k_i^{\circ T} = \left[\sqrt{q_{i1}} \quad \sqrt{q_{i2} + 2\sqrt{r_i q_{i1}}} \right] / \sqrt{r_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (21)$$

где r_i, q_{i1}, q_{i2} – параметры из выражений (19). Соотношения (21) при заданном функционале (19) однозначно определяют значения коэффициентов $k_{i1}^\circ, k_{i2}^\circ$ оптимального управления (20). Однако для реализации этого управления необходимо иметь значения $g_i = z_{i1}$, т. е. значения переменных z_{i1} , $i = 1, 2, 3$ желаемого конечного состояния точки M трипода. Эти значения должны определяться с учетом ограничений (6) и (10).

4. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРИПОДОМ

Из приведенных соотношений вытекает следующий алгоритм оптимального, мультиагентного управления триподом (рис. 1).

Для работы этого алгоритма управления триподом по переводу его точки M из начального положения M_0 в конечное M_1 необходимы следующие

исходные данные: $OA, OB, l_{i\min}, l_{i\max}, m, x_B, \varphi, g, q_{11}, q_{12}, r_1, q_{21}, q_{22}, q_{23}, r_2, q_{31}, q_{32}, q_{33}, r_3, x_{M0}, y_{M0}, z_{M0}, x_{M1}, y_{M1}, z_{M1}, v_{i0}, i=1, 2, 3$. Здесь v_{i0} – значение управления u_i , под действием которого система пришла в точку M_0 . Собственно алгоритм включает следующие шаги.

Шаг 1. Полагаются $g_i = z_{i1} = w_{i1} - w_{i0}, z_{i0} = 0, i=1, 2, 3; w_{1\mu} = x_{M\mu}, w_{2\mu} = y_{M\mu}, w_{3\mu} = z_{M\mu}, \mu=1, 2$. По формулам (21) и (20) вычисляются значения $u_i^\circ(t), i=1, 2, 3$, и все системы (18) интегрируются по времени от 0 до ∞ , т. е. на интервале от M_0 до M_1 и находятся векторы $z_i(t), i=1, 2, 3$. При этом значения параметров r_i, q_{i1}, q_{i2} выбираются такими, чтобы переходный процесс не имел перерегулирования.

Шаг 2. По значениям $z_i(t)$ и $u_i^\circ(t)$ вычисляются значения $w_i(t)$ и $v_i(t)$ по формулам $w_i(t) = w_{i0} + z_i(t)$ и $v_i(t) = u_i^\circ(t) + v_{i0}, i=1, 2$, и $v_3(t) = u_3^\circ(t) + v_{30}$. Находятся переменные $x_i(t)$ по формулам $[x_1 \ x_2]^T = [w_{11} \ w_{12}]^T, [x_3 \ x_4]^T = [w_{21} \ w_{22}]^T, [x_5 \ x_6]^T = [w_{31} \ w_{32}]^T$ и переменные $\tilde{x}_i(t)$ по формулам $\tilde{x}_1 = x_1, \tilde{x}_2 = x_3, \tilde{x}_3 = x_5, \tilde{x}_4 = x_2, \tilde{x}_5 = x_4, \tilde{x}_6 = x_6$. По формулам (16) вычисляется управление $\tilde{v}_3(t)$ и составляется вектор $v(x) = [v_1(x) \ v_2(x) \ \tilde{v}_3(x)]$.

Шаг 3. Проверяется выполнение условий (10) и (6) вдоль всей оптимальной траектории. Если эти условия не выполняются, то некоторая точка траектории оказывается вне рабочей зоны трипода при данном значении угла φ . В этом случае изменяется угол φ и повторяются шаги 1, 2 и 3 до тех пор, пока все точки оптимальной траектории не будут удовлетворять условиям (10) и (6). При выполнении этих условий выполняется переход к шагу 4.

Шаг 4. По формулам (8), (9) и (11) вычисляются матрица $B(\tilde{x})$, ее определитель – полином $D_B(x) = \det B(\tilde{x})$ и вектор управлений $F = F(x)$. Если все значения $F(x)$ не превышают допустимых значений, то по формулам (1) определяются оптимальные законы изменения длин $l_1^\circ(x), l_2^\circ(x), l_3^\circ(x)$.

Шаг 5. Так как найденные выше переменные $x_i = x_i(t), i=1, \overline{6}$, являются функциями времени, то полученные функции $l_1^\circ(x), l_2^\circ(x), l_3^\circ(x)$ фактически представляют собою оптимальные законы изменения во времени длин управляемых звеньев 1, 2 и 3 агентами с целью перевода точки M трипода из начального положения M_0 в конечное M_1 . Поэтому на данном шаге эти функции подаются агентами на входы соответствующих электроприводов, которые обрабатывают их, обеспечивая оптимальное перемещение точки M трипода. В установившемся режиме будут выполняться условия: $x_{1\text{уст}} = x_{M1}, x_{3\text{уст}} = y_{M1}, x_{5\text{уст}} = z_{M1}$, что соответствует положению точки M трипода в заданном положении M_1 . Приведенный алгоритм, вообще говоря, позволяет реализовать оптимальную траекторию перехода рабочего инструмента трипода из точки M_0 в точку M_1 , которая определяется коэффициентами функ-

ционала (22). Такая траектория может иметь достаточно сложный характер и, как видно, учет ограничений существенно усложняет ее построение.

Представляется более рациональным задавать траекторию движения инструмента из M_0 в M_1 исходя из технологических соображений. Например, согласно [8, 10] для наискорейшего перехода из точки M_0 в точку M_1 траектория должна быть прямолинейной. Естественно, она может соответствовать и другой кривой, например параболе. В этом случае значительно проще учесть указанные выше ограничения, а назначенную траекторию целесообразно обрабатывать по шагам.

В рассматриваемом триподе (см. рис. 1) изменение длин управляющих звеньев, за счет чего происходит перемещение его схвата (точки M) по заданной траектории, осуществляется электроприводами, поэтому агенты должны формировать задающие воздействия для этих приводов. При шаговом движении точки M агенты формируют задающие воздействия g_{li} , $i = 1, 2, 3$, в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} g_{11}(t) &= \sqrt{x^2(t) + (y(t) + a)^2 + (z(t) - c)^2}, \\ g_{12}(t) &= \sqrt{(x(t) - b)^2 + y^2(t) + z^2(t)}, \\ g_{13}(t) &= \sqrt{(x(t) + b)^2 + y^2(t) + z^2(t)}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $a = OA \sin \varphi$, $c = OA \cos \varphi$, $b = 0,5BC$ (см. рис. 2),

$$\begin{aligned} x(t) &= x[k\Delta_t] + \Delta_{x(k+1)}1(t - k\Delta_t), \quad y(t) = y[k\Delta_t] + \Delta_{y(k+1)}1(t - k\Delta_t), \\ z(t) &= z[k\Delta_t] + \Delta_{z(k+1)}1(t - k\Delta_t), \quad k\Delta_t \leq t \leq (k+1)\Delta_t, \quad k = 0, 1, 2, \dots, k_m. \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь k_m – относительная длительность времени перехода схвата из точки M_0 в точку M_1 ; приращения Δ_{xk} , Δ_{yk} , Δ_{zk} определяются заданными траекториями пространственного движения схвата при одинаковом интервале квантования по времени Δ_t .

Электроприводы всех трех звеньев трипода идентичны, а их нагрузки мало отличаются друг от друга, поэтому задающие воздействия (22) и (23) обрабатываются соответствующими электроприводами, на которые агенты подают управления, вычисляемые ими на основе следующих, практически аналогичных алгоритмов:

$$\begin{aligned} u_{i,k} &= 0,017094u_{i,k-1} + 1,111111g_{li,k} - 1,025641g_{li,k-1} - \\ &- 6,333333l_{i,k} + 1,205128l_{i,k-1}, \quad i = 1, 2, 3, \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (24)$$

Алгоритмы действий агентов (24) построены с применением метода АССУВВ [21, 22]. При этом предполагается, что время на измерение и преобразование данных, а также на вычисление текущих значений управле-

ний $u_{i,k}$ по сравнению с периодом квантования по времени Δ_t в (23) малó, так что им можно пренебречь.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Оценка эффективности разработанного мультиагентного управления триподом осуществлялась путем моделирования на ПЭВМ. При этом рассматривался случай отработки заданных прямолинейной и параболической траекторий движения точки M (схвата) из начального положения $O_0(x_0, y_0, z_0)$, в конечное $O_1(x_1, y_1, z_1)$. Траектории задавались, естественно, так, чтобы все их точки удовлетворяли условиям (10) и (6). Расчеты и моделирование выполнялись в MATLAB применительно к триподу с параметрами $OA = 79$ см, $BC = 70$ см при $\varphi = 35^\circ$. На рис. 3–5 представлены некоторые результаты моделирования.

Схват переводится из точки O_0 с координатами $x_0 = 5$ см, $y_0 = 30$ см, $z_0 = 68$ см в точку O_1 с координатами $x_1 = 20$ см, $y_1 = 42$ см, $z_1 = 88$ см по прямолинейной траектории, а из точки O_0 с координатами $x_0 = 5$ см, $y_0 = 30$ см, $z_0 = 63$ в точку O_1 с координатами $x_1 = 25$, $y_1 = 42$ и $z_1 = 93$ см – по параболической траектории. Графики изменения задающих воздействий $g_{li}(t)$, $i = 1, 2, 3$, соответствующие (25) и (26) при $\Delta_t = 0,2$ с и $k_m = 10$, приведены на рис. 3.

На рис. 4 приведены графики изменения отклонений только переменной $z(t)$. Графики изменения отклонений переменных $x(t)$ и $y(t)$ имеют аналогичный вид. Для большей наглядности графики на рис. 4 и рис. 5 построены в отклонениях Δx , Δy и Δz от вспомогательной точки B с координатами $x_B = 0$, $y_B = 20$, $z_B = 63$ см. Соответствующие траектории в отклонениях пространственных движений схвата по прямолинейной и параболической траекториям показаны на рис. 5.

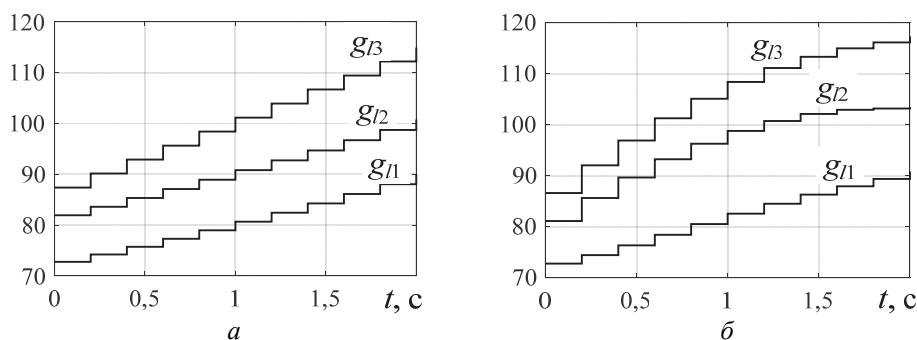


Рис. 3. Заданные изменения длин управляемых звеньев трипода

Приведенные графики свидетельствуют, что манипулятор на основе трипода под управлением предложенной в данной работе мультиагентной системы обеспечивает перемещения схвата по заданным достаточно произвольным пространственным траекториям.

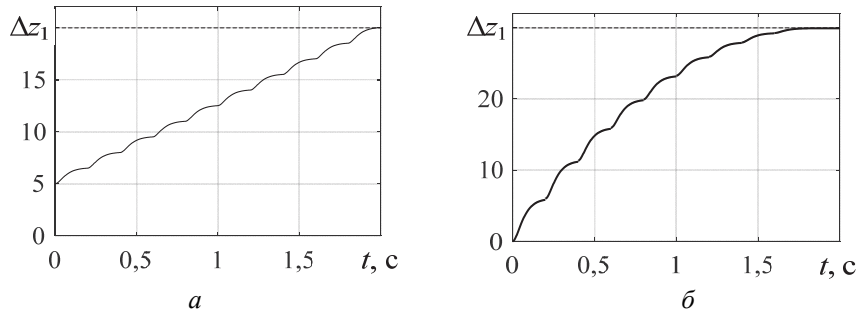


Рис. 4. Отклонения переменной $z(t)$ схвата трипода при прямолинейной (а) и параболической (б) траекториях

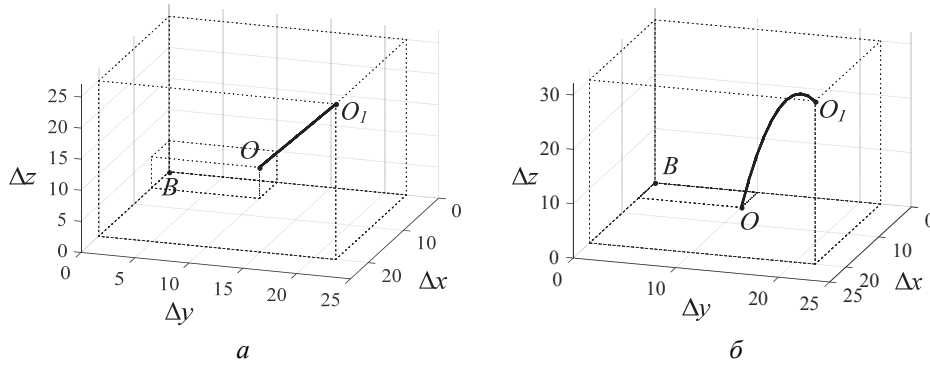


Рис. 5. Траектории движения схвата в отклонениях:
а – прямолинейная; б – параболическая

Отметим, что в приведенном примере шаг по времени Δt намеренно принят большим для наглядности процесса отработки заданных траекторий триподом под управлением мультиагентной системы. При меньших значениях шага по времени переход манипулятора из одной заданной точки в другую протекает аналогично, но с меньшими вариациями скорости движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данной работе метод позволяет создавать мультиагентные системы управления механизмами параллельной структуры, которые имеют несколько взаимосвязанных кинематических цепей. Для синтеза системы управления манипулятором в данной работе применены декомпозирующее управление и мультиагентный подход, что позволило существенно упростить процедуру синтеза законов управления. Методом АССУВВ построены соответствующие алгоритмы работы агентов, что позволило придать мультиагентной системе управления манипулятором параллельной структуры заданные показатели качества как в переходном, так и в установившемся режиме. Показано, что желаемые пространственные траектории движения рабочего инструмента целесообразно формировать в соответствии с необходимыми технологическими операциями.

Предложенный подход может применяться при создании систем управления механизмами параллельной структуры, предназначенными для решения различных задач промышленной, сельскохозяйственной, социальной и специальной сфер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управляющие системы промышленных роботов / Ю.Д. Андрианов, Л.Я. Глейзер, М.Б. Игнатъев и др.; под общ. ред. И.М. Макарова, В.А. Чиганова. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
2. *Craig J.J.* Introduction to robotics: mechanics and control. – Reading, MA: Addison-Wesley, 1986. – 246 p.
3. *Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н.* Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1986. – 264 с.
4. *Егоров И.Н.* Манипуляционные исполнительные системы лазер-роботов: структуры, конструкция и управление // Мехатроника, автоматизация, управление: первая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: труды. – М.: Новые технологии, 2004. – С. 252–253.
5. *Афанасьев Р.А., Ермолов И.Л.* Особенности роботизации агротехнологий точного земледелия // Десятая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: МКПУ-2017: материалы 10-й Всероссийской мультиконференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11–16 сентября 2017 г.): в 3 т. – Ростов н/Д; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – Т. 2. – С. 18–20.
6. *Жога В.В., Покровский Д.Н., Артемов В.И.* Робототехнический комплекс малого класса экологического назначения // Мехатроника, автоматизация, управление: первая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: труды. – М.: Новые технологии, 2004. – С. 256–258.
7. *Merlet J.-P.* Parallel robots. – Dordrecht: Springer, 2006. – P. 15–79.
8. *Герасун В.М., Несмиянов И.А.* Системы управления манипуляторами на основе пространственных исполнительных механизмов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 2. – С. 24–28.
9. *Хейло С.В., Глазунов В.А., Палочкин С.В.* Манипуляционные механизмы параллельной структуры: структурный синтез, кинематический и силовой анализ. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011. – 153 с.
10. *Несмиянов И.А.* Особенности структурного исследования манипуляторов параллельно-последовательной структуры // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 5-й международной научно-практической конференции / под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 715–722.
11. *Серебрянный В.В., Бошняков А.А., Овсянкин Г.И.* Оптимизация и мультипликация перемещений в механизмах параллельной кинематики // Десятая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: МКПУ-2017: материалы 10-й Всероссийской мультиконференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11–16 сентября 2017 г.): в 3 т. – Ростов н/Д; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – Т. 2. – С. 51–56.
12. *Колоколова К.В., Гайдук А.Р.* Синтез систем автоматического управления неустойчивыми многомерными объектами // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 1 (66). – С. 26–40.
13. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism / C.M. Gosselin, X. Kong, S. Foucault, I. Bonev // Parallel Kinematic Machines in Research and Practice: The 4 Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. – Chemnitz, Germany, 2004. – P. 595–610.
14. *Дячкин-Титов В.В., Павловский В.Е.* Задача оптимального управления перемещением схвата манипулятора-трипода // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2014. – № 4 (36). – С. 231–236.
15. *Gaiduk A.R., Vershinin Y.A., West M.J.* Neural networks and optimization problems // Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications. – Glasgow, UK, 2002. – P. 37–41.
16. *Angeles J.* The qualitative synthesis of parallel manipulators // Journal of Mechanical Design. – 2004. – Vol. 126. – P. 617–624.

17. Kong X., Gosselin C. Type synthesis of parallel mechanisms. – Berlin; New York: Springer, 2007. – 275 p.
18. Каляев И.А., Гайдук А.Р. Стайные принципы управления в группе роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 12. – С. 29–33.
19. Капустян С.Г. Сервис-ориентированный подход к организации функционирования сетцентрической системы управления гетерогенной группой роботов при выполнении потока сложных задач // Десятая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: МКПУ-2017: материалы 10-й Всероссийской мультиконференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11–16 сентября 2017 г.): в 3 т. – Ростов н/Д; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – Т. 2. – С. 285–288.
20. Станкевич Л.А. Мультиагентная технология в когнитивных системах управления автономными роботами // X научно-техническая конференции «Экстремальная робототехника»: материалы конференции. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – С. 62–70.
21. Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А. Синтез динамических систем по требуемым показателям качества // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 4. – С. 7–12.
22. Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А. Анализ и синтез систем управления с применением системных инвариантов в MATLAB. – Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2016. – 128 с.
23. Гайдук А.Р. Оптимальные и адаптивные системы автоматического управления. – М.: Училиствз, 2006. – 158 с. – ISBN 5-8367-0042-X.

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-51-66

Multiagent Control by Parallel Structure Mechanisms Based on the Decoupled Approach*

A.R. GAIDUK¹, S.G. KAPUSTYAN², E.A. PLAKSIENKO³, K.V. KOLOKOLOVA⁴

¹ Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347922; Kislovodsk Humanitarian-Technical Institute, 37a, Pobedy Prospekt, Russian Federation, D. Sc.(Eng), Prof. E-mail: gaiduk_2003@mail.ru

² Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2, Chekhov St., Taganrog, 347928, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), leading researcher; SFedU Acad. Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems, head of department. E-mail: kap56@mail.ru

³ Taganrog Institute of Management and Economics, 45, Petrovskaya St., Taganrog, 347900, Russian Federation, PhD, (Eng), associate professor. E-mail: pumkad@mail.ru

⁴ Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347922; Russian Federation, assistant lecturer. E-mail: kbesklubova@mail.ru

Recently parallel structure mechanisms have been more and more often used instead of console type manipulators. These mechanisms allow achieving higher speeds, accelerations and accuracy of movements of work tools caused by such technological operations as laying-out and laser cutting of sheet materials, assembly, welding and many others. In this connection the problem of developing corresponding design methods of control becomes quite relevant. The known design methods results in rather complex control systems both from the point of view of their design and their realization. One of the challenges is taking into account the working area limitation of parallel structure mechanisms, especially when designing control optimal in terms of the square-law criteria. The design method of multiagent control for parallel structure mechanisms is suggested on the example of tripod control. Control laws and algorithms are generated on the basis of a decoupled approach and a method of analytical system design with control by output and impacts (ASDCOI). Application of this analytical method allows creating multiagent control systems for parallel structure mechanisms with the necessary quality parameters in transient and steady state modes.

* Received 22 September 2017.

In the given paper the known mathematical tripod model is used. It is shown that desirable trajectories of work tool movements should be formed based on the developed manipulator tasks. The computer simulation results confirm the efficiency of the suggested approach. The developed approach can be applied to create multiagent manipulators with parallel structure mechanisms for solving a wide scope of problems such as application of fertilizers, environmental observations, improving quality of the system machine vision, and carrying out many industrial and technological operations.

Keywords: Console manipulator, parallel structure mechanism, tripod, movement trajectory, control, system, design, decoupled approach, control by output and impacts

REFERENCES

1. Makarova I.M., Chiganova V.A., ed. *Upravlyayushchie sistemy promyshlennykh robotov* [Control systems of industrial robots]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 288 p.
2. Craig J.J. *Introduction to robotics: mechanics and control*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1986. 246 p.
3. Burdakov S.F., D'yachenko V.A., Timofeev A.N. *Proektirovanie manipulyatorov promyshlennykh robotov i robotizirovannykh kompleksov* [Designing of industrial robots manipulators and robotized complexes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 264 p.
4. Egorov I.N. [Manipulation service systems of laser-robots: structures, construction and control]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie: pervaya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: trudy* [Mechatronics, automation, control: Proceedings of the First All-Russia scientific-technical conference with the international participation]. Moscow, Novye tekhnologii Publ., 2004, pp. 252–253. (In Russian).
5. Afanas'ev R.A., Ermolov I.L. [Robotization feature of exact agricultural technology]. *Desyataya Vserossiiskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: MKPU-2017: materialy 10-i Vserossiiskoi mul'tikonferentsii* [X international multimedia conference on management: MKPU-2017: materials of the 10th international multimedia conference]. Rostov-on-Don, Taganrog, SFEDU Publ., 2017, vol. 2, pp. 18–20. (In Russian).
6. Zhoga V.V., Pokrovskii D.N., Artemov V.I. [Robototechnical complex of a small class with ecological purpose]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie: pervaya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: trudy* [Mechatronics, automation, control: Proceedings of the First All-Russia scientific-technical conference with the international participation]. Moscow, Novye tekhnologii Publ., 2004, pp. 256–258. (In Russian).
7. Merlet J.-P. *Parallel robots*. Dordrecht, Springer, 2006, pp. 15–79.
8. Gerasun V.M., Nesmiyanov I.A. Sistemy upravleniya manipulyatorami na osnove prostanstvennykh ispolnitel'nykh mekhanizmov [Manipulators control systems on the base of spatial acting mechanisms]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2010, no. 2, pp. 24–28.
9. Kheilo S.V., Glazunov V.A., Palochkin S.V. *Manipulyatsionnye mekhanizmy parallel'noi struktury: strukturnyi sintez, kinematicheskii i silovoi analiz* [Manipulation mechanisms of parallel structure: structural synthesis, kinematics and force analysis]. Moscow, MGTU namely A.N. Kosygin Publ., 2011. 153 p.
10. Nesmiyanov I.A. [Features of structural research of parallel-serial structure manipulators]. *Sovremennoe mashinostroenie: nauka i obrazovanie: materialy 5-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern mechanical engineering: science and education: materials of 5th international scientific-practical conference]. St. Petersburg, 2016, pp. 715–722. (In Russian).
11. Serebrennyi V.V., Boshlyakov A.A., Ovsyankin G.I. [Optimization and animated cartoon of movings in mechanisms of parallel kinematics]. *Desyataya Vserossiiskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: MKPU-2017: materialy 10-i Vserossiiskoi mul'tikonferentsii* [X international multimedia conference on management: MKPU-2017: materials of the 10th international multimedia conference]. Rostov-on-Don, Taganrog, SFEDU Publ., 2017, vol. 2, pp. 51–56. (In Russian).
12. Kolokolova K.V., Gaiduk A.R. Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya neustoiichivymi mnogomernymi ob'ektami [Synthesis of control systems by unstable multivariable plants]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (66), pp. 26–40.

13. Gosselin C.M., Kong X., Foucault S., Bonev I. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism. *Parallel Kinematic Machines in Research and Practice: The 4 Chemnitz Parallel Kinematics Seminar*. Chemnitz, Germany, 2004, pp. 595–610.
14. Dyashkin-Titov V.V., Pavlovskii V.E. Zadacha optimal'nogo upravleniya peremeshcheniem skhvata manipulyatora-tripoda [Task of optimal control of manipulator-tripod gripper moving]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie – Proceedings of Nizhnevolzhskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*, 2014, no. 4 (36), pp. 231–236.
15. Gaiduk A.R., Vershinin Y.A., West M.J. Neural networks and optimization problems. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications*, Glasgow, UK, 2002, pp. 37–41.
16. Angeles J. The qualitative synthesis of parallel manipulators. *Journal of Mechanical Design*, 2004, vol. 126, pp. 617–624.
17. Kong X., Gosselin C. *Type synthesis of parallel mechanisms*. Berlin, New York, Springer, 2007. 275 p.
18. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R. Stainye printsipy upravleniya v gruppe robotov [Gregarious principles of control in robots group]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2004, no. 12, pp. 29–33.
19. Kapustyan S.G. [Service-focused approach to functioning organization of network control systems of robots heterogeneous group at performance of challenges stream]. *Desyataya Vserossiiskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: MKPU-2017: materialy 10-i Vserossiiskoi mul'tikonferentsii [X international multimedia conference on management: MKPU-2017: materials of the 10th international multimedia conference]*. Rostov-on-Don, Taganrog, SFEDU Publ., 2017, vol. 2, pp. 18–20. (In Russian).
20. Stankevich L.A. [Multiagent technology in когнитивных control systems of autonomous robots]. *X nauchno-tekhnicheskaya konferentsii "Ekstremal'naya robototekhnika": materialy konferentsii [Proceedings of the International Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics"]*. St. Petersburg, 1999, pp. 62–70. (In Russian).
21. Gaiduk A.R., Plaksienko E.A. Sintez dinamicheskikh sistem po trebuemym pokazatelyam kachestva [Design of dynamic systems on required quality parameters]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2008, no. 4, pp. 7–12.
22. Gaiduk A.R., Plaksienko E.A. *Analiz i sintez sistem upravleniya s primeneniem sistemnykh invariantov v MATLAB [Analysis and synthesis of control systems with application of system invariants in MatLab]*. Saarbrücken, Deutschland, Palmarium Academic Publishing, 2016. 128 p.
23. Gaiduk A.R. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Optimal and adaptive automatic control systems]*. Moscow, Uchlitvuz Publ., 2006. 246 p. ISBN –5-8367-0042-X.

Для цитирования:

Мультиагентное управление механизмом параллельной структуры на основе декомпозирующего подхода / А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян, Е.А. Плаксиенко, К.В. Колоколова // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 51–66. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-51-66.

For citation:

Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Plaksienko E.A., Kolokolova K.V. Mul'tiagentnoe upravlenie mekhanizmom parallel'noi struktury na osnove dekompoziruyushchego podkhoda [Multiagent control by parallel structure mechanisms based on the decoupled approach]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 51–66. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-51-66.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.58

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-67-78

Фотофиксация и регулирование переходных параметров газожидкостного потока*

В.И. ГУЖОВ¹, И.А. САЖИН², В.А. ШУМЕЙКО³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кафедра систем сбора и обработки информации, доктор технических наук, профессор. E-mail: v.guzhov@corp.nstu.ru

² 630005, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кафедра технической теплофизики, кандидат технических наук, доцент. E-mail: sazhin@corp.nstu.ru

³ 630005, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кафедра автономных информационных и управляющих систем, старший преподаватель. E-mail: shumeyko@corp.nstu.ru

Рассмотрены методики Кутателадзе–Сорокина и Бейкера, а также их применение для оптимизации затрат при транспортировке газосодержащих жидкостей. Приведен пример комплексов Кутателадзе–Сорокина к определению вида течения газожидкостного потока. Рассмотрена методика Бейкера для определения вида течения горизонтального двухфазного двухкомпонентного газожидкостного потока. Приведены карты течений Беггза и Брилла. Рассматривается работа экспериментальной установки для установления параметров потока при переходе от одного режима течения к другому. Реализован вертикально восходящий двухфазный газожидкостный поток. Проведена фоторегистрация дисперсного режима течения (жидкая фаза практически отсутствует), формирования пенообразного режима течения, пробкового режима (моменты разрушения пробки), процесса формирования кольцевого режима течения. Выполнен численный анализ изменения параметров двухфазного потока при изменении режима течения. Для перехода от снарядного режима к кольцевому требуется изменение истинной скорости газовой фазы на 18 %, для перехода от снарядного к пенообразному – на 7 %, для перехода от пенообразного к дисперсному – на 67 %. Полученные данные соответствуют картам режимов течения Кутателадзе–Сорокина и Бейкера. Показана возможность синтеза системы управления для реализации определенного режима течения двухфазного потока. Определены значения градиентов давления в контрольных сечениях трубы конденсатора. Проведено сравнение полученных данных с известными картами режимов течения двухфазных сред.

Показана принципиальная возможность реализации системы управления переходами от одного режима течения к другому для газожидкостных смесей разной природы.

Полученные результаты позволяют уточнить параметры системы автоматического регулирования, предназначенной для увеличения холодопроизводительности пароконденсационной холодильной установки.

* Статья получена 25 августа 2017 г.

Определены относительные величины истинных скоростей газовой фазы, соответствующие переходам от одного режима течения к другому в газожидкостном потоке.

Ключевые слова: двухфазная среда, режимы течения, экспериментальная установка, фотофиксация, граничные параметры потока, система управления, холодильные установки, автоматизация

ВВЕДЕНИЕ

Задача оптимизации затрат на энергопотребление холодильных установок достаточно актуальна. В статье рассмотрен вопрос о снижении затрат при транспортировке газосодержащих жидкостей.

В настоящее время проводятся исследования, в которых рассматриваются эмпирические методы регулирования режимов течения двухфазных сред (жидкость–газ) [1]. Задачи оптимизации тепломассообмена и снижения потерь на трении целесообразно решать с помощью управления режимами течения двухфазных потоков. Наиболее достоверные результаты получены с помощью методик Кутателадзе–Сорокина и Бейкера [1, 2].

В качестве примера рассмотрим реальный цикл пароконденсационной холодильной установки в координатах $\lg P-i$ (P – давление, i – энтальпия) [2] (рис.1). Энтальпия – это энергия, которая доступна для преобразования в теплоту при определенном постоянном давлении.

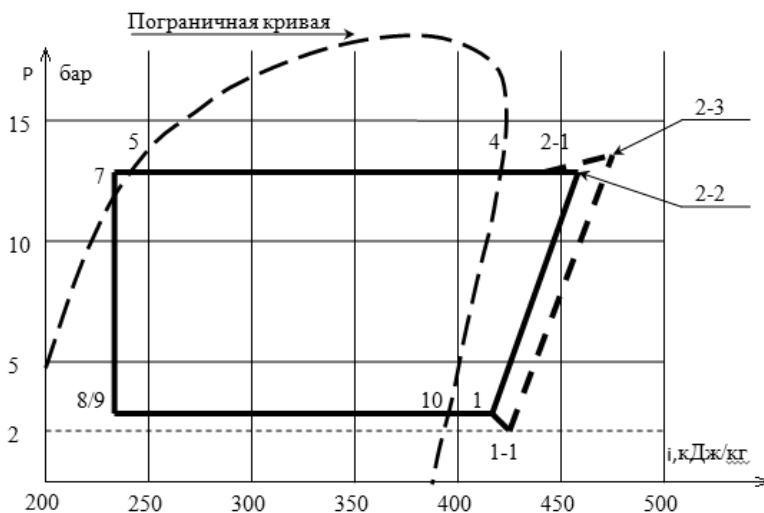


Рис. 1. Цикл холодильной машины, работающей на фреоне R22

Пограничная кривая (подковообразная пунктирная линия) разделяет жидкое и смешанное состояния, а также состояние перегретого пара хладагента. Состояние 1 (точка 1) соответствует всасывающему трубопроводу компрессора. Состояние 2 (точка 2-1) соответствует нагнетательной магистрали компрессора. На практике наблюдается деформация цикла холодильной машины (точки 1-1, 2-2, 2-3), вызванная перегревом хладагента в компрессоре, потерями давления на нагнетательной и всасывающей магистралях. Состояние 4 (точка 4) – вход в конденсатор. Состояние 5 (точка 5) – выход из конденсатора. Состояние 7 (точка 7) – вход в регулирующий вентиль (начало

процесса дросселирования хладагента. Состояние 8–9 (точка 8/9) – выход из регулирующего вентиля (давление и температура рабочего тела уменьшаются) и вход в испаритель. Состояние 10 (точка 10) – выход из испарителя. Массовый расход при холодопроизводительности 32 кВт равен $G_{R22} = 0,179$ кг/с. Площадь сечения трубы конденсатора диаметром $D = 0,025$ м составляет $S_0 = 4,909 \cdot 10^{-4}$ м². В точке 4 цикла [2], соответствующей началу процесса конденсации, температура хладона R22 равна $T_4 = 303$ К, давление $P_4 = 11,92 \cdot 10^5$ Па. Сплошная линия диаграммы цикла, соответствующая процессу конденсации [4], условно разделена на десять участков для анализа состояния газожидкостного потока хладагента. Массовое газосодержание ($X_{\text{газ}}$) изменяется от 1 (точка 4) до 0 (точка 5) с шагом 0,1. Исключение составляет промежуточная точка в первом участке. Относительное массовое газосодержание равно $X_{\text{газ}} = 0,95$. Расчетные значения критической температуры T_{4K} , коэффициента поверхностного натяжения σ_{T4} , удельного объема газовой фазы v_4 , плотности газовой фазы ρ_4 приняты в соответствии с параметрами состояния смеси [4]. Плотность и коэффициент динамической вязкости жидкой фазы R22 вычислены по соотношениям (1) и (2), приведенным в [5]:

$$\rho_{L4} = 4963 + 1,93578(369,28 - T_{4K}) + 173,975(369,28 - T_{4K})^{\frac{1}{3}} - 0,002(369,28 - T_{4K})^2 - 17,867(369,28 - T_{4K})^{\frac{1}{2}}; \quad (1)$$

$$\mu_{T4} = 10^{-6} \left[23,6136 - 9,5414\tau_{T4} + 1,67446\tau_{T4}^2 \right] (\tau_{T4})^{0.5}, \quad (2)$$

где $\tau_{T4} = T_{4K} / T_4$.

Значения величин плотностей из работ [2, 4] соответствуют вычисленным по соотношениям (1) и (2).

Карта течений газожидкостных систем Кутателадзе–Сорокина построена в координатах комплексов $K-N$ [2] (4) и (5), при вычислении которых необходимо знать (или задать) параметры двухфазного потока (приведенные скорости фаз, их плотности, коэффициент поверхностного натяжения в определенном сечении конденсатора). Рассмотрены два случая возможных комбинаций режимов течения хладагента в конденсаторе. Первый случай – наличие постоянной области кольцевого режима течения (не более 2/3 общей длины трубопровода конденсатора), второй случай – когда в конденсаторе существенно увеличена область кольцевого режима течения двухфазной среды (более 70 % от общей длины).

Ниже рассмотрен пример применения комплексов Кутателадзе–Сорокина к определению вида течения газожидкостного потока. В табл. 1 представлены значения комплексов Кутателадзе–Сорокина.

Таблица 1

Значения комплексов Кутателадзе–Сорокина

$X_{\text{газ}}$	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,95
K	1,701	5,103	8,505	10,206	11,907	16,160
N	11,984	10,486	7,490	5,992	4,494	0,749

Следуя [1], приведенные скорости фаз вычислим следующим образом (для газовой и жидкой соответственно):

$$W_{GAS4} = \frac{G_{R22} \cdot X_{\text{газ}}}{\rho_4 \cdot S_4}, \quad W_{\text{жид4}} = \frac{G_{R22}(1 - X_{\text{газ}})}{\rho_{L4} S_0}. \quad (3)$$

Комплексы Кутателадзе–Сорокина имеют вид

$$K = \left(\frac{g \cdot (\rho_{L4} - \rho_4)}{\rho_4^2 \cdot \sigma_{T4}} \right)^{\frac{1}{4}} W_{GAS4}, \quad (4)$$

$$N = \frac{1}{4} \left(\frac{(\rho_{L4} - \rho_4)^4 \sigma_{T4}^2}{\rho_{L4}^2 \cdot g^5 \cdot D^6} \right)^{\frac{1}{4}} \left(1 + 31g \frac{\sigma_{T4}^{\frac{3}{2}}}{\rho_4} \left(\frac{\rho_{L4}}{(\rho_{L4} - \rho_4)} \right)^{0,55} \right) W_{\text{жид4}}, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения.

На рис. 2 отмечены расчетные точки в координатах комплексов Кутателадзе–Сорокина.

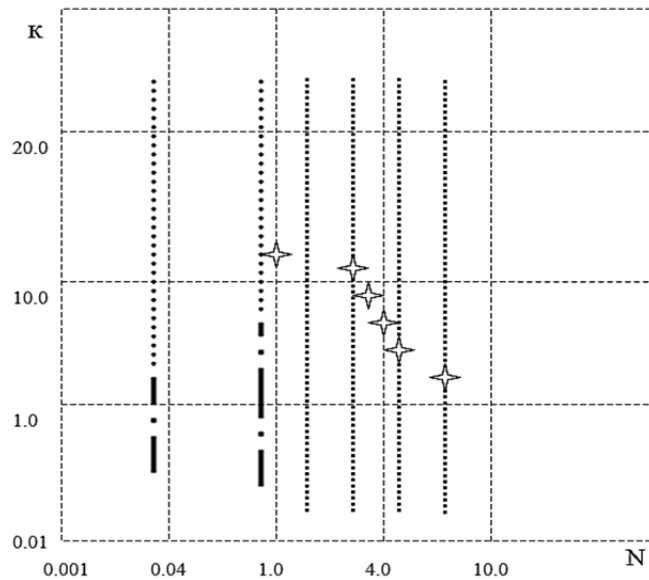


Рис. 2. Диаграмма режимов течения Кутателадзе–Сорокина:

..... – кольцевой режим течения со срывом капель; – дисперсно-кольцевой режим течения; ———— – снарядный режим течения; ☆ – расчетная точка

Следуя [2–4], изменение газосодержания по мере прохождения конденсатора от точки 4 до точки 5 (цикл холодильной машины на рис. 1) носит параболический закон. Полученные значения комплексов позволяют определить координаты точек на карте течений Кутателадзе–Сорокина [2], соответствующие дисперсному режиму течения при газосодержании 0,9...0,7, дисперсно-кольцевому – 0,7...0,1 и 1,0...0,09 – пограничному состоянию ближе к снарядному режиму течения.

Карта течений Беггза и Брилла [6] также показывает наличие разных режимов течения. Соответствующие этой методике комплексы вычисляются следующим образом:

$$\lambda_{B1} = \frac{\rho_4(1 - X_{\text{газ}})}{\rho_{L4} \cdot X_{\text{газ}} + \rho_4(1 - X_{\text{газ}})}, \quad (6)$$

$$L_{B1} = 316\lambda_{B1}^{0,302}, \quad L_{B2} = 0,000925\lambda_{B1}^{-2,468}, \quad L_{B3} = 0,1\lambda_{B1}^{-1,452}. \quad (7)$$

Число Фруда в данном случае принято в виде

$$Fr = \frac{W_{\Sigma LG}^2}{g \cdot D}, \quad (8)$$

где $W_{\Sigma LG}$ – сумма приведенных скоростей фаз

$$W_{\Sigma LG} = W_{GAS4} + W_{\text{жид}4}. \quad (9)$$

Для относительного массового газосодержания $X_{X4} = 0,7$ число Фруда Fr больше L_{B1} и параметр λ_{B1} меньше 0,4, что означает наличие кольцевого режима течения.

На интервале $0,6 < X_{X4} < 0,2$ число Фруда $L_{B3} < Fr < L_{B1}$ и параметр $0,01 < \lambda_{B1} < 0,4$ – пробковый либо снарядный режим течения.

Наличие дисперсного режима течения при относительном газосодержании от 0,95 до 0,8, а также отдельного режима течения при уменьшении относительного газосодержания от 0,2 до 0,0 [2, 6] методикой Беггза и Брилла достоверно не определяется.

Рассмотрим методику Бейкера [8] определения параметров газожидкостного потока. На рис. 3 приведена диаграмма Бейкера режимов горизонтального двухфазного двухкомпонентного потока. В качестве комплексов приняты следующие соотношения:

$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_{L4}}{1000} \right) \left(\frac{\rho_4}{1,2} \right) \right]^{0,5}, \quad \psi = \left[\left(\frac{73}{\sigma_{T4}} \right) \left(\frac{\mu_{T4}}{1} \right) \left(\frac{1000}{\rho_{L4}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (10)$$

где $G_f, G_g \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} \right]$ – массовые расходы жидкой и газовой фаз соответственно.

Размерность коэффициента поверхностного натяжения $\left[\frac{\text{дин}}{\text{см}} \right]$, коэффициента динамической вязкости [спз].

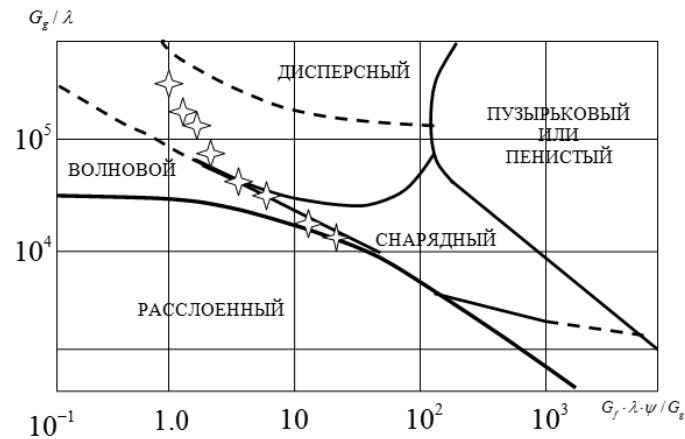


Рис. 3. Диаграмма Бейкера режимов горизонтального двухфазного двухкомпонентного потока (☆ – отмечены точки, соответствующие значениям из табл. 2)

Таким образом, следуя диаграмме Бейкера и значениям комплексов Бейкера, представленных в табл. 2, в рассматриваемом конденсаторе кольцевой режим течения реализован для значений газосодержания от 0,3 до 0,7, при газосодержании 0,2 и 0,1 – снарядный режим течения. Следует отметить, что возможность реализации снарядного и раздельного режимов течения на выходе из конденсатора установлена аналитически и экспериментально [3, 4]. В целом методики Бейкера и Кутателадзе–Сорокина могут быть использованы для регулирования режимов течения газожидкостного потока хладагента.

Таблица 2

Значения комплексов Бейкера

X_{X4}	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,95
G_g/λ	$1,836 \cdot 10^4$	$3,672 \cdot 10^4$	$5,508 \cdot 10^4$	$7,343 \cdot 10^4$	$9,179 \cdot 10^4$	$11,02 \cdot 10^4$	$12,85 \cdot 10^4$	$17,44 \cdot 10^4$
$G_f \lambda \psi / G_g$	31,349	13,933	8,128	5,225	3,483	2,322	1,493	0,189

В задачах динамики двухфазных сред, как правило, рассматриваются следующие режимы течения: дисперсный, пенообразный, снарядный (пробковый), кольцевой, раздельный. Каждый из режимов характеризуется соответствующим газосодержанием, потерей давления, скоростью потока и другими параметрами. На практике важно реализовать такие теплофизические параметры двухфазного потока, которые позволяют получить необходимый в данном конкретном случае режим течения (дисперсный, пенообразный, снарядный, пробковый, кольцевой, раздельный). Однако переход от одного к другому режиму течения происходит при незначительных изменениях параметров потока [2, 8, 15]. Поэтому практически важными являются задачи обеспечения строго определенного режима течения в процессе эксплуатации систем, содержащих многофазные среды. Например, недопустимо наличие

снарядного, пенообразного, пробкового режимов течения в магистральных трубопроводах в силу возникающих вибрационных нагрузок и скачков давлений [9–14]. Таким образом, представляется целесообразным изучение теплофизических параметров газожидкостных сред в процессах перехода от одного режима течения к другому.

В данной статье рассмотрена работа экспериментальной установки для наблюдения и измерения параметров двухфазной смеси при переходе от одного режима течения к другому. В процессе работы варьировались газосодержание и давление потока. Представлены результаты исследований зависимости варьируемых параметров и режимов течения двухфазного потока жидкость–газ, проведен анализ изменения теплофизических параметров смеси в процессах перехода от одного режима течения к другому.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследование возможности регулирования переходных процессов в восходящем газожидкостном потоке проведено на экспериментальной установке с замкнутым циклом движения жидкости (рис. 4).

- 4 – вертикальная стеклянная трубка диаметром 10 мм;
- 1, 2 – дозаторы жидкой фазы, установленные в нижней части стеклянной трубки;
- 5 – накопительный резервуар, из которого жидкость попадает в дозатор;
- 6 – компрессор, обеспечивающий необходимый объемный расход газовой фазы;
- 7 – амперметр, регулирующий ток в электродвигателе компрессора;
- 3 – трубки подачи жидкости к форсункам;
- 8 – аппаратура для видеорегистрации процессов перехода от одного режима течения к другому

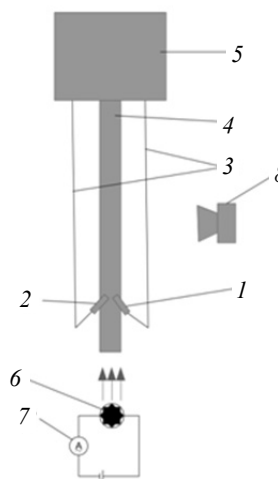


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

На первом этапе исследования выбраны рабочие интервалы величин расходов газовой фазы, реализуемых компрессором, при которых можно получить основные режимы течения двухфазной среды (дисперсный, пенообразный, снарядный, пробковый, кольцевой). Проведена калибровка форсунок (поз. 1, 2, рис. 1) в соответствии с величиной расхода газовой фазы. Выполнена настройка аппаратуры видеофиксации.

На втором этапе проведена видеорегистрация переходных процессов течения двухфазного потока. Наиболее характерные из них, по мнению авторов, представлены на рис. 5.

Зафиксированы соответствующие значения величин расходов газовой фазы. Результаты измерений скорости потока для разных режимов течения смеси сведены в табл. 3.

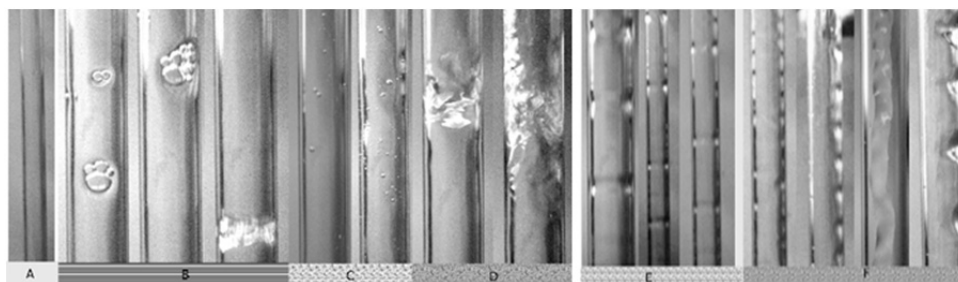


Рис. 5. Режимы течения:

А – дисперсный режим течения (жидкая фаза практически отсутствует); В – формирование пенообразного режима течения; С – пузырьковый режим течения; D – пробковый режим (сняты моменты разрушения пробки); Е – снарядный режим течения; F – кольцевой режим течения и процесс его формирования

Таблица 3

Результаты измерений скорости потока

Тип течения	Изменение скорости газовой фазы в %
Пробковый режим	23,81
Пенообразный режим	33,52
Снарядный режим	40,36
Кольцевой режим	58,78
Дисперсный режим	100

В правом столбце таблицы величины давления двухфазного потока выражены относительно величины, полученной при реализации дисперсного течения. Например, для перехода от снарядного режима течения к кольцевому требуется изменение истинной скорости газовой фазы на 18 %, для перехода от снарядного к пенообразному – на 7 %, для перехода от пенообразного к дисперсному – на 67 %.

В работе [16] показана возможная реализация системы автоматического регулирования режимов течения.

Принципиальная схема системы регулирования режимов течения приведена на рис. 6.

Для увеличения эффективности работы конденсатора (или испарителя) пароконденсационных теплообменных установок предлагается применить систему регулирования режимов течения газожидкостного потока, состоящую из следующих блоков:

- датчики измерения параметров газожидкостного потока;
- цифровой или аналоговый блок обработки и преобразования поступающей информации, а также формирования команд управления, поступающих от компьютера;
- устройства для изменения концентрации фаз;
- компьютер.

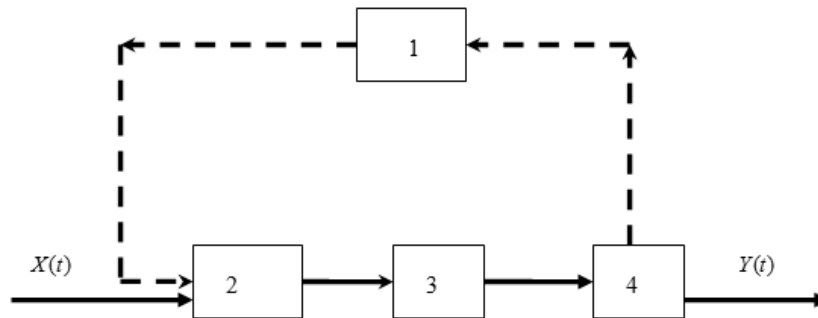


Рис. 6. Схема системы регулирования режимов течения:

1 – датчики; 2 – компьютер; 3 – преобразователь сигнала; 4 – исполнительный блок (устройства изменения газосодержания потока); $X(t)$, $Y(t)$ – сигналы входа и выхода

Существующие контроллеры способны обработать входные сигналы, соответствующие расходам жидкой и газовой фаз, а также выработать сигнал управления дозаторами, что позволяет обеспечить необходимый режим течения двухфазной смеси в трубопроводе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По методикам [8, 11, 12] определены значения градиентов давления в контрольных сечениях трубы конденсатора. Наименьшие потери (доли процента от общих потерь) наблюдаются в газовой фазе. Градиенты давления потока хладагента в жидком состоянии и в режиме двухфазного потока отличаются на 18 %. Наличие снарядного режима течения на выходе из конденсатора может увеличить градиент давления на 35 % по сравнению с жидкой фазой. В целом общая величина потерь давления не превосходит 3 % от рабочего давления в конденсаторе холодильной установки.

Измерение величины давления, скорости, температуры хладагента в контрольных сечениях совместно с анализом комплексов карт режимов течения позволяет достоверно определить состояние хладагента в конденсаторе [8]. Зафиксированные режимы течения двухфазной среды соответствуют картам режимов течения Кутателадзе–Сорокина и Бейкера [1, 2, 8].

Приведена схема экспериментальной установки для регистрации моментов переходов от одного режима течения к другому в газожидкостном потоке, определены относительные величины истинных скоростей газовой фазы, соответствующие этим переходам. Проведено сравнение полученных данных с известными картами режимов течения двухфазных сред. Показана принципиальная возможность реализации системы управления переходами от одного режима течения к другому для газожидкостных смесей разной природы.

Полученные результаты позволяют оптимизировать параметры системы автоматического регулирования [16], предназначенной для увеличения холодопроизводительности парокompрессионной холодильной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метод регулирования процессом теплоотдачи в конденсаторе холодильной установки / В.И. Гужов, И.А. Сажин, А.И. Сажин, В.А. Шумейко // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 1 (7). – С. 13–19.
2. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – 5-е изд., доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
3. *Rifert V.G., Ozimay S.S.* The analysis of the regimes of phases flow and of methods of calculation of heat transfer during the condensation inside the horizontal tubes // Heat Transfer in Condensation: Proceedings of the Eurotherm Seminar 47, October 4–5, Paris, France. – Paris, 1995. – P. 78–85.
4. *Маке В., Эккерт Г.-Ю., Кошпен Ж.-Л.* Польшманн: учебник по холодильной технике: пер. с фр. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 1529 с.
5. *Лэнгли Б.К.* Холодильная техника и кондиционирование воздуха. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 479 с.
6. *Борис А.А., Лягов А.В.* Определение режима течения потоков газожидкостной смеси в трубопроводах на установках путевого сброса воды Арланской группы месторождений ОАО «АНК Башнефть» [Электронный ресурс] // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 2. – С. 66–78. – URL: http://ogbus.ru/authors/Boris/Bogis_1.pdf (дата обращения: 16.03.2018).
7. Теплофизические свойства фреонов. Т. 1. Фреоны метанового ряда: справочные данные / В.В. Алтунин, В.З. Геллер, Е.К. Петров, Д.С. Рассказов, Г.А. Спиридонов; под ред. С.А. Ривкина. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 232 с.
8. *Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н.* Кольцевые двухфазные течения / пер. с англ. В.Я. Сидорова. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.
9. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 486 с.
10. *Бердников В.С., Митин К.А.* Сопряженный конвективный теплообмен в вертикальном слое жидкости // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2012. – Т. 7, вып. 1. – С. 70–79.
11. *Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И.* Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. – Новосибирск: ИТФ, 1987. – 282 с.
12. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
13. *Choi S.U.S.* Nanofluids: from vision to reality through research // Journal of Heat Transfer. – 2009. – Vol. 131. – P. 033106-1–033106-9.
14. *Terekhov V.I., Ekaid A.L.* Natural convection between vertical parallel plates with asymmetric heating and cooling // Proceedings of the 6th Baltic Heat Transfer Conference ВНТС 2011, August 24–26, 2011, Tampere, Finland. – Tampere, 2011. – N 185. – P. 1–11.
15. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements / W. Yu., D.M. France, J.L. Routbort, S.U.S. Choi // Heat Transfer Engineering. – 2008. – Vol. 29, N 5. – P. 432–460.
16. Патент 159644 Российская Федерация. Система автоматического регулирования процессом теплоотдачи холодильной установки / В.И. Гужов, А.И. Сажин, В.А. Шумейко, И.А. Сажин. – № 2015142833/06; заявл. 07.10.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5.

Гужов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – оптические методы исследований материалов. Имеет более 200 публикаций. E-mail: v.guzhov@corp.nstu.ru

Сажин Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – теплофизические свойства жидкостей. Имеет более 50 публикаций. E-mail: sazhin@corp.nstu.ru

Шумейко Владимир Александрович, старший преподаватель кафедры автономных информационных и управляющих систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – автоматизация и управление. Имеет более 20 публикаций. E-mail: shumeyko@corp.nstu.ru

Photorecording and control of transient parameters of the gas-liquid flow*V.I. GUZHOV¹, I.A. SAZHIN², V.A. SHUMEYKO³

¹ Novosibirsk State Technical University, department of data acquisition and processing systems, D. Sc. (Eng.), professor, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk 630073, Russia E-mail: v.guzhov@corp.nstu.ru

² Novosibirsk State Technical University, department of engineering thermal physics, associate professor, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk 630005, Russia E-mail: sazhin@corp.nstu.ru

³ Novosibirsk State Technical University, department of autonomous information and control systems, senior lecturer, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk 630005. E-mail: shumeyko@corp.nstu.ru

The Kutateladze-Sorokin and Baker procedures and their application for the optimization of costs during gassy liquids transportation are addressed in the paper. An example of the Kutateladze-Sorokin complexes to determine the kind of the gas-liquid flow is also given. The Baker method of determining the kind of a horizontal two-phase flow is considered. The Beggs and Brill flow maps are shown. An experimental setup for determining flow parameters in transition from one flow to another is described. Vertically upward two-phase gas-liquid flow is implemented. Photographic recording of the dispersed flow (the liquid phase is practically absent), of the formation of the foam flow, of the plug flow (moments of the plug destruction), and of the process of forming the annular flow is made. A numerical analysis of changing the parameters of a two-phase flow when it changes is also made. For the plug flow to change over to the annular flow a change in the true speed of the gas phase by 18 % is required. For the plug flow to change over to the foam flow a change in the true speed of the gas phase by 7 % is required while for the foam flow to change over to the dispersed flow a change in the true speed of the gas phase by 67 % is required. The data obtained correspond to the values of Kutateladze-Sorokin and Baker maps. A possibility of synthesizing a control system for the implementation of a certain two-phase flow is demonstrated. The values of the pressure gradients in the test section of the condenser pipe are found. The data obtained are compared with the known two-phase flow medium maps.

A possibility of implementing control system transitions from one flow regime to another for liquid mixtures of different nature is demonstrated.

The obtained results make it possible to specify the parameters of an automatic control system intended to increase the cooling capacity of vapor compression refrigeration systems.

Relative values of the true velocity of the gas phase corresponding to transitions from one flow regime to another in the gas-liquid flow are determined.

Keywords: Two-phase environment, flow regime, experimental setup, photorecording, flow boundary parameters, control system, refrigerating plant, automation

REFERENCES

1. Guzhov V.I., Sazhin I.A., Sazhin A.I., Shumeyko V.A. Metod regulirovaniya protsessom teplotdachi v kondensatore kholodil'noi ustanovki [Method of control heat transfer in condenser freezer]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya – Automatics & Software Engineering*, 2014, no. 1 (7), pp. 13–19.
2. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. 5th ed. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 416 p.
3. Rifert V.G., Ozimay S.S. The analysis of the regimes of phases flow and of methods of calculation of heat transfer during the condensation inside the horizontal tubes. *Heat Transfer in Condensation: Proceedings of the Eurotherm Seminar 47*, Paris, France, 1995, pp. 78–85.
4. Maake W., Eckert H.-J., Cauchepin J.-L. *Le Pohlmann : manuel technique du froid*. Ivry-sur-Seine, Pyc Edition, 1993 (Russ. ed.: Make V., Ekkert G.-Yu., Koshpen Zh.-L. *Pol'mann: uchebnik po kholodil'noi tekhnike*. Moscow, MSU Publ., 1998. 1529 p.).

* Received 25 August 2017.

5. Langley B.C. *Refrigeration and air conditioning*. Reston, Va, Reston Pub. Co, 1978 (Russ. ed.: Lengli B.K. *Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie vozdukh*. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1981. 479 p.).
6. Boris A.A., Lyagov A.V. Opredelenie rezhima techeniya potokov gazozhidkostnoi smesi v truboprovodakh na ustanovkakh putevogo sbrosa vody Arlanskoï gruppy mestorozhdenii OAO "ANK Bashneft" [The determination of current gas-liquid mix stream mode at the pipeline in oil and petroleum gas gathering system of JSC ANK «Bashneft» on Arlan group of oilfields]. *Neftegazovoe delo – Oil and Gas Business*, 2012, no. 2, pp. 66–78. Available at: http://ogbus.ru/authors/Boris/Boris_1.pdf (accessed 16.03.2018).
7. Altunin V.V., Geller V.Z., Petrov E.K., Rasskazov D.S., Spiridonov G.A. *Teplofizicheskie svoystva freonov*. T. 1. *Freony metanovogo ryada: spravochnye dannye*. Ed. by S.A. Rivkin. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1980. 232 p.
8. Hewitt G.F., Holl-Taylor N.S. *Annular two-phase flow*. Oxford, Pergamon Press, 1972 (Russ. ed.: Kh'yuit Dzh., Khol-Teilor N. *Kol'tsevye dvukhfaznye techeniya*. Moscow, Energiya Publ., 1974. 408 p.).
9. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 486 p.
10. Berdnikov V.S., Mitin K.A. Sopryazhenniy konvektivnyy teploobmen v vertikal'nom sloe zhidkosti [The convective conjugate heat transfer in a vertical liquid layer]. *Vestnik NGU. Seriya: Fizika – Vestnik NSU. Series: Physics*, 2012, vol. 7, iss. 1, pp. 70–79.
11. Kutateladze S.S., Volchkov E.P., Terekhov V.I. *Aerodinamika i teplomassoobmen v ogranichennykh vikhrevykh potokakh* [Aerodynamics and heat and mass transfer in confined vortex flows]. Novosibirsk, Institut teplofiziki Publ., 1987. 282 p.
12. Wallis G. One dimensional two-phase flow. New York, McGraw-Hill, 1969 (Russ. ed.: Uollis G. *Odnomernyye dvukhfaznye techeniya*. Moscow, Mir Publ., 1972. 440 p.).
13. Choi S.U.S. Nanofluids: from vision to reality through research. *Journal of Heat Transfer*, 2009, vol. 131, pp. 033106-1–033106-9.
14. Terekhov V.I., Ekaid A.L. Natural convection between vertical parallel plates with asymmetric heating and cooling. // *Proceedings of the 6th Baltic Heat Transfer Conference BHTC 2011*, August 24–26, 2011, Tampere, Finland, no. 185, pp. 1–11.
15. Yu W., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U.S. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements. *Heat Transfer Engineering*, 2008, vol. 29, no. 5, pp. 432–460.
16. Guzhov V.I., Sazhin A.I., Shumeyko V.A., Sazhin I.A. *Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya protsessom teplootdachi kholodil'noi ustanovki* []. Patent RF, no. 159644, 2016.

Для цитирования:

Гужов В.И., Сажин И.А., Шумейко В.А. Фотофиксация и регулирование переходных параметров газожидкостного потока // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 67–78. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-67-78.

For citation:

Guzhov V.I., Sazhin I.A., Shumeyko V.A. Fotofiksatsiya i regulirovanie perekhodnykh parametrov gazozhidkostnogo potoka [Photorecording and control of transient parameters of the gas-liquid flow]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 67–78. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-67-78.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 519.233.22

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-79-102

Системная гармония перевода поэтических текстов*

Ю.Д. ГРИГОРЬЕВ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: lisitsin@ami.nstu.ru

На примере анализа поэтического текста при переводе с немецкого языка рассматриваются системные характеристики перевода как процесса отображения одной знаковой системы на другую, а именно подстрочника на перевод. На основе предложенной Гаспаровым методики анализа переводов с помощью коэффициентов точности и вольности перевода вводится понятие функций системной гармонии, порождающих наряду с известными константами золотого сечения $\varphi = 0.618$ и $\varphi^{-1} = \Phi = 1.618$ две другие гармонические константы, $G^* = \Phi/3$ и $W^* = 1 - G^*$, характеризующие системные свойства перевода. В основу методики положен подсчет знаменательных слов в подстрочнике и переводе, при этом отмечаются методологические трудности ее использования. Рассмотрены 36 переводов 24 стихотворений известных немецких поэтов Гете, Гейне, Шторма, Ленау, Рильке, Эйхендорфа, Мерики, Фонтане и Георге. Стихотворения представлены в переводах крупнейшего переводчика, выдающегося германиста А. Карельского и известного поэта-переводчика В. Левика. Для сравнения с ними с системной точки зрения приведены также переводы автора данной статьи. На основе проведенного анализа делается вывод, что системные закономерности перевода возникают в значительной степени вне зависимости от эстетического уровня перевода и характеризуют не столько этот уровень, сколько специфику задачи перевода как таковой. Отмечается, что наибольшие отклонения от системных закономерностей наблюдаются в коротких стихотворениях. Особо выделяется класс стихотворений с одинаковым количеством знаменательных слов в подстрочнике и в переводе. Отмечается, что в этом случае может наблюдаться двойная системная гармония.

Ключевые слова: коэффициенты точности и вольности, знаменательные слова, системный подход, самоорганизующаяся система, системообразующие константы, мера эстетического, функция системной гармонии, стилеметрический анализ, двойная системная гармония, обобщенные коэффициенты Гаспарова

* Статья получена 05 сентября 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

Отправной точкой для данной статьи послужила небольшая работа Гаспарова [1], в которой на основе соответствующих коэффициентов предлагается количественный подход к измерению показателей точности и вольности перевода. Несмотря на то что в целом ряде работ по теории перевода настойчиво подчеркивается относительность понятия точности [2], мы все-таки рискнем последовать призыву Гаспарова продолжить работу в направлении детализации предложенной им методики измерения точности перевода, «что может быть шагом к превращению “переводоведения” из импрессионистического искусства в точную науку» [1, с. 372].

Это тем более представляется важным, что с момента написания указанной заметки получены новые данные о структурной организации знаковых систем с конечным числом элементов. Это позволяет в ряде случаев привлечь к анализу поэтических текстов некоторые положения системного анализа (см., например, [4]).

Согласно общей теории перевода [5] любой перевод можно рассматривать как отражение средствами одной системы (подстрочника) определенной реальности, отражаемой средствами другой (перевода) [4, с. 227]. Закономерности, возникающие при таком отражении одного текста в другой, могут представлять определенный интерес с точки зрения системной гармонии. Это открывает возможности как для анализа творчества отдельных переводчиков, так и для сравнительной характеристики творческой манеры различных переводчиков.

Конечно, об эстетическом совершенстве того или иного перевода в данном случае речь не идет. Речь идет о другом – о привлечении количественных методов для оценивания различных закономерностей, возникающих в процессе перевода, а также о диагностическом потенциале этих методов при измерении «стилевой манеры» разных переводчиков.

1. ПЕРЕВОДЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАК СИСТЕМНОЕ ЯВЛЕНИЕ

Системный подход в переводческой науке занимает довольно прочное место (см., например, [5]). Отметим лишь, что основные категории перевода, такие как *отражение*, *эквивалентность*, *адекватность* и *структурность*, филологи часто трактуют как «изоморфизм», «гомоморфизм», «гомология» и прочее, что, вообще говоря, не отвечают строгому математическому смыслу этих терминов. Скорее, это фигуры речи, предназначенные для обозначения различных соответствий $\Gamma = \langle Q, X, Y \rangle$, где X, Y – конечные множества слов, порождаемые подстрочником и переводом, $Q \subseteq X \times Y$ – график соответствия [6, гл. 5]. В частности, в понимании филологов, среди соответствий, встречающихся в теории перевода, наиболее близкими к понятиям изоморфизма и гомоморфизма являются биекции, сюръекции и инъекции.

Перевод как системное явление. Начнем с цитаты: «Тот факт, что реальному наблюдению и научному анализу при переводе поддаются лишь данные “на входе” и “на выходе”, в то время как сам интеллектуальный про-

цесс переводческого преобразования происходит скрытно, превращает теорию перевода в сопоставительную дисциплину, а сам процесс перевода в некоторое системное явление. Все выводы о механизме перевода делаются на основе сопоставления исходных и результирующих данных» [4, с. 215]. В рамках данной статьи такими данными будут *знаменательные слова* подстрочника и перевода. К знаменательным словам, следуя Гаспарову, будем относить существительные, глаголы, прилагательные и наречия.

Категории теории перевода. Любой перевод представляет собой отражение одной знаковой системы, скажем B , \mathcal{S} , определенной и уже отраженной средствами другой, скажем A . Таким образом, запись $\phi: A \rightarrow B$ означает, что в процессе перевода соответствующая комбинация знаков семиотической системы A (языка оригинала) интерпретируется в знаках семиотической системы B (языка перевода). Исходное речевое произведение A предстает как прообраз для переводчика, который создает его образ $B = \phi(A)$. «Стремится ли он в самом деле к тому, чтобы созданный им образ был изоморфен прообразу, чтобы созданное им речевое произведение было абсолютно таким же, каким было бы, если бы сам автор сотворил его на языке перевода? Об этом можно было бы спросить у Бродского, который сам переводил некоторые свои стихи на английский язык» [6].

По этому поводу Гарбовский пишет, что «скорее, следует говорить о некотором подобии образа прообразу при известном, вполне допустимом упрощении и изменении *системы смыслов*, заключенных в оригинальном речевом произведении, т. е. об отношении гомоморфизма» [4, с. 244].

Наряду с категорией *смысла* центральной в теории перевода является категория *эквивалентности*. Эквивалентность предстает как довольно сложное и многогранное понятие, которое до сих пор однозначно не интерпретировано в теории перевода. Тем не менее в рамках данной статьи мы будем постоянно прибегать в неявной форме к помощи эквивалентов, подсчитывая коэффициенты точности и вольности Гаспарова.

Теперь обратимся к Гарбовскому, практически дословно воспроизведя фрагмент его рассуждения о категории *структурности* [Там же, с. 227]. Это позволит нам связать системный подход с обсуждаемой в работе [7, с. 69–81] идеей наличия инвариантов системы при ее различных преобразованиях (фрагменты, которые для краткости опускаем, помечаем знаком [...]).

«Структурность предполагает возможность описания системы через установление ее структуры, т. е. сети связей и отношений внутри системы, а также обусловленность поведения системы не столько поведением ее отдельных элементов, сколько свойствами ее структуры. [...] Именно эти свойства присущи любому виду перевода и составляют его *инвариант*, т. е. именно все то, что остается устойчивым и относительно неизменным при переходе от одной разновидности перевода к другой».

Поиск инвариантов перевода составляет основную задачу при системном подходе к теории перевода, поскольку «преобразования (вариации) и их инварианты – важнейшие понятия и в сфере науки, и в сфере искусства!» [8, с. 298]. Эта мысль проходит красной нитью и через высказывания Эшби о связи понятия устойчивости с идеей инвариантности [9, с. 109]:

«Эта идея состоит в том, что хотя система в целом претерпевает последовательные изменения, некоторые ее свойства («инварианты») сохраняются

неизменными. Таким образом, некоторое высказывание о системе, несмотря на непрерывное изменение, будет неизменно истинным».

Этот вывод о структурном единстве мира на материале самых разнообразных объектов действительности, в том числе на материале задач перевода, и вызывает «проблему изучения законов строения систем, законов структурной гармонии и устойчивости» [7, с. 75]. Именно обсуждению этого вопроса о наличии системно гармоничных характеристик поэтического перевода, т. е. его инвариантов, посвящена данная работа.

2. ТЕОРИЯ ГАРМОНИИ В ПРИЛОЖЕНИИ К ТЕОРИИ ПЕРЕВОДА

Начнем изложение данного вопроса с видения задач перевода глазами филолога, а завершим его мнением представителей точных наук.

Точный и вольный переводы. Ключевым моментом, обсуждаемым в данной статье, являются понятия точности и вольности поэтического перевода. Будем апеллировать в этом вопросе к указанной выше статье Гаспарова, в которой предлагается количественный подход к измерению показателей точности и вольности перевода. Начнем с прямой цитаты [1, с. 361–372]:

«Переводческий процесс состоит из двух этапов: понимания и оформления. Обычно при анализе они трудно делимы: когда мы видим в переводе с оригинала какое-то отклонение от подлинника, мы, как правило, не можем сказать, то ли здесь переводчик увидел в словах подлинника больше (или меньше), чем видим мы, то ли он увидел то же, что и мы, и только не сумел (или не захотел) уложить увиденное в строки перевода. При переводе с подстрочника они разделены: понимание текста целиком задает подстрочник, оформление берет на себя переводчик. Отклонение от буквы оригинала переводчик может объяснить своим “проникновением в дух” подлинника; отклонение от подстрочника никак не может быть “проникновением в дух”, а может быть только “от лукавого”, только вольностью переводчика [...]».

Переводы эти можно противопоставить как «точный» («буквалистский» в буквальном смысле этого слова) и «вольный» («творческий», как принято ныне выражаться). Но спрашивается: нельзя ли эти понятия выразить в количественных показателях, нельзя ли сказать не просто «один перевод точнее, а другой вольнее», но и «один настолько-то точнее, другой настолько-то вольнее»? Мы использовали очень простой и грубый, но, думается, для начала достаточно показательный способ измерения точности: подсчет количества *знаменательных* слов (существительных, прилагательных, глаголов, наречий), сохраненных, измененных, опущенных и добавленных в переводе по сравнению с подстрочником. Мы выделяем четыре типа пословного соответствия между подстрочником и переводом:

- а) точное воспроизведение слова из подстрочника [...];
- б) замена слова из подстрочника однокоренным синонимом [...];
- в) замена слова из подстрочника разнокоренным синонимом [...];
- г) опущение слова из подстрочника или добавление слов, которых не было в подстрочнике [...].

Придадим методике Гаспарова (а-э) более точный математический смысл. Введем следующие обозначения:

$N = |A|$ – количество знаменательных слов подстрочника A ;

$M = |B| = |\phi(A)|$ – количество знаменательных слов перевода B ;

x – количество слов подстрочника, опущенных в переводе;

y – добавленные слова, т. е. это слова, которых не было в подстрочнике;

z – замена слова из подстрочника семантически эквивалентным ему разнокоренным синонимом.

Введение переменных x , y , z , являющихся параметрами отображения $\phi: A \rightarrow B$, полностью покрывает все ситуации, отмеченные в пунктах (а-э) методики Гаспарова. Учитывая, что согласно ей $M = N - (x - y)$, можем соответственно записать коэффициенты точности и вольности Гаспарова в виде

$$G = \frac{N - (x + z)}{N}, \quad W = \frac{y + z}{N - (x - y)}. \quad (1)$$

Стремясь упростить методику анализа перевода без существенного ее искажения, сознательно отойдем от введения параметра z . Для этого все слова (δ) будем по-прежнему считать сохранившимися в переводе, а каждое слово (ϵ) заменим парой слов, одно из которых считаем теперь удаленным (увеличиваем значение x), а другое – добавленным (увеличиваем значение y). Например, в подстрочнике имеем *белое платье*, а в переводе – *воздушное платье*. Ясно, что семантически эквивалентная замена слова *белое* словом *воздушное* соответствует ситуации (ϵ), которую мы и хотим из методики исключить.

С учетом сказанного выражения (1) для коэффициентов G и W , которые в неявном виде использованы Гаспаровым, теперь принимают вид

$$G = \frac{N - x}{N}, \quad W = \frac{y}{N - (x - y)}. \quad (2)$$

В данном случае мы упростили изложение методики Гаспарова, сведя ситуацию замены (ϵ) к удалению и вставке соответствующих слов. Сравнение формул (1) и (2) показывает, что результат подсчета по ним коэффициентов G и W остается неизменным, но само использование методики Гаспарова на основе (2) становится проще.

О существе пропусков, вставок и формально далеких замен, о формализме в переводе более подробно говорится в монографии [1, с. 124]. Все это мы принимаем к сведению, но, стремясь не впадать в бесконечную дискуссию по этому поводу, принимаем подход Гаспарова и переходим к существу вопроса.

Измерение системной гармонии перевода. Коэффициенты точности и вольности не отражают всей сложности задачи перевода, так как невозможно заменить одним или двумя числами экспертную оценку, охватывающую все аспекты эстетического восприятия перевода. Это, в общем-то, и понятно.

Слова в подстрочнике мы меняем, но качество этих замен коэффициенты Гаспарова не отражают. Другое дело, что, по-видимому, существуют какие-то скрытые закономерности, которым перевод как дискретная система может подчиняться. Но каковы эти закономерности?

Чтобы как-то приблизиться к ответу на данный вопрос, будем рассматривать законченный перевод как систему, которая находится в стационарном состоянии, характеризуемом экстремальным значением некоторого функционала. Еще Чебышев отмечал, что если некоторая задача не сводится к задаче на экстремум, то она не представляет интереса.

В теории гармонии давно известна формула Биркгоффа *меры эстетического* [10, с. 74] и ее интерпретатора немецкого искусствоведа Бензе [11]:

$$M = O / S, \quad (3)$$

где M – мера эстетического, O – мера порядка, S – мера сложности. Отсюда видим, что мера Биркгоффа (3) вполне согласуется с коэффициентами Гаспарова, хотя для полной оценки эстетичности предъявляемого объекта только по коэффициентам G и W нет серьезных оснований, но важен сам подход.

Вопрос измерения эстетического обстоятельно рассматривается в книге Биркгоффа [12]. Краткий комментарий по поводу меры Биркгоффа–Бензе приводится в недавно вышедшей из печати книги [13], посвященной вопросам измерения гармонии на основе золотого сечения. Вводимые ниже функции системной гармонии от коэффициентов точности и вольности (2) будем рассматривать как некоторую конкретизацию меры (3).

Функция системной гармонии. Пусть $F : [0, 1] \rightarrow R^1$ – некоторая функция *качества* перевода, заданная на отрезке $[0, 1]$. В нашем контексте в качестве аргумента этой функции будут выступать коэффициенты точности и вольности.

Положим $F(0) = 0$, $F(1) = 0$. Что это означает? Если $G = 0$, т. е. $x = N$, то в окончательный перевод не попадает ни одного знаменательного слова из подстрочника. Что же это за перевод? Это совершенно другое стихотворение. Пусть теперь $G = 1$, т. е. $x = 0$. Это означает, что теперь все наоборот: все знаменательные слова оказались в переводе. Подстрочник по существу остался неизменным. И опять, что же это за перевод?

Все слова остались на месте, и ничего не добавилось. В обоих случаях качество перевода равно нулю.

Поскольку реальному переводу соответствует значение $G \in (0, 1)$, то естественно предположить, что функция качества перевода F имеет унимодальный характер: сначала она возрастает от $F(0) = 0$, а затем убывает до $F(1) = 0$. То значение G^* , при котором F достигает максимума, соответствует какому-то системному свойству перевода, характеризующему его качество. Считая, что такая функция априори существует, назовем ее функцией *системной гармонии*. Смысл упоминания о гармонии станет понятным ниже. Все сказанное относим и к коэффициенту вольности.

Можно предположить, что перевод – это *самоорганизующаяся* система. Преследуя чисто эстетические цели, переводчик постепенно приводит систему (подстрочник) к удовлетворяющему его окончательному виду или, выражаясь системным языком, приводит ее к устойчивому состоянию. Устойчивое состояние характеризуется точками экстремума ее функции системной гармонии F . Коэффициенты G и W – это аттракторы, к которым притягивается система в результате перевода. Таков смысл функции F .

Какой реально может быть функция F ? Поскольку в природе все должно быть просто, будем искать F в классе полиномиальных функций. Начнем с квадратичного случая. С учетом наложенных ограничений это может быть только функция $F(x) = ax(1-x)$, где a – коэффициент пропорциональности, не влияющий на положение точки максимума x^* функции F . Очевидно, что $x^* = 1/2$. Это означает, что наиболее гармоничный с системной точки зрения перевод достигается при значении коэффициента Гаспарова G (или W), равном 50%. Это так называемая *дихотомия*. Однако в теории гармонии встречаются и более интересные способы деления отрезка $[0, 1]$, к числу которых относится, например, золотое сечение [13].

Обобщая случай дихотомии на более общий случай и предполагая, что в качестве функций системной гармонии рассматриваются полиномы степени k , можно показать, что имеет место

Теорема 1. Пусть $F : [0, 1] \rightarrow R^1$ – функция системной гармонии, относительно которой выполнены следующие условия:

- 1) F – унимодальная функция вида $F(x) = \sum_{i=0}^k a_i x^{k-i}$, $k = 2, 3, 4$;
- 2) $F(0) = F(1) = 0$ – граничные условия;
- 3) $F(x) \geq 0$, $x \in [0, 1]$;
- 4) H – двойственная к F функция, определяемая условием $H(x) = F(1-x)$.

Тогда имеют место следующие утверждения:

- 1) в качестве F и H могут быть выбраны следующие функции:

Функции	Степень k полинома $F(x) = \sum_{i=0}^k a_i x^{k-i}$		
	2	3	4
F	$x(1-x)$	$x(1-x)(x+2+\phi)$	$x^2(1-x)(2\phi+1-x)$
H	$x(1-x)$	$x(1-x)(3+\phi-x)$	$x(1-x)^2(x+2\phi)$

где

$$\phi = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0.618, \quad \phi^{-1} = \Phi = \frac{\sqrt{5}+1}{2} = 1.618 \quad (4)$$

гармонические константы, называемые малым и большим золотыми сечениями;

2) функции F и H достигают максимума в следующих точках x^* и $y^* = 1 - x^*$:

Точки максимума	Степень k полинома $F(x) = \sum_{i=0}^k a_i x^{k-i}$		
	2	3	4
$x^* = \max_{x \in [0, 1]} F(x)$	0.5	$G^* = \frac{1 + \sqrt{5}}{6} = 0.54$	$\phi = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} = 0.62$
$y^* = \max_{y \in [0, 1]} H(y)$	0.5	$W^* = \frac{5 - \sqrt{5}}{6} = 0.46$	$1 - \phi = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} = 0.38$

3) гармонические константы

$$G^* = 0.54, \quad W^* = 0.46 \quad (5)$$

делят отрезок $[1 - \phi, \phi]$ на равные части, т. е. $\phi - G^* = G^* - W^* = W^* - (1 - \phi) = \frac{\sqrt{5} - 2}{3} = 0.0787$.

Отметим, что из равенства $G^* + W^* = 1$ не следует взаимная дополнительность коэффициентов Гаспарова G и W до единицы в реальных переводах. В действительности их сумма в общем случае не равна единице, а приведенное выше равенство – лишь следствие нашего предположения о двойственности функций F и H . В связи с этим константы G^* , W^* и ϕ , $1 - \phi$, дающие в сумме единицу, также будем называть *двойственными*.

Задание в качестве коэффициентов точности и вольности (2) двух из четырех системно гармоничных констант $c_i, c_j \in \{1 - \phi, \phi, G^*, W^*\}$ позволяет поставить и решить следующую обратную задачу: какие значения (или близкие к ним) должны принимать величины x и y при данном N , чтобы перевод был системно гармоничен? Именно, имеет место

Теорема 2. Обозначим x , y – количество удаленных из подстрочника и вставленных в перевод знаменательных слов соответственно, $[a]$ – округление a до ближайшего целого. Пусть выполнены следующие условия:

- 1) N – количество знаменательных слов подстрочника;
- 2) $c_i, c_j \in \{1 - \phi, \phi, G^*, W^*\}$ – коэффициенты точности и вольности соответственно.

Тогда

- 1) перевод системно гармоничен, если

$$x = [(1 - c_i)N], \quad y = [c_i c_j N / (1 - c_j)]; \quad (6)$$

- 2) если $c_i + c_j = 1$, то $x = y = [c_j N]$;

- 3) если $c_i = c_j$, то

	Значение коэффициентов точности и вольности при $c_i = c_j$			
	0.62	0.54	0.46	0.38
xN^{-1}	$\frac{3-\sqrt{5}}{2} = 0.38$	$\frac{5-\sqrt{5}}{6} = 0.46$	$\frac{1+\sqrt{5}}{6} = 0.54$	$\frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0.62$
yN^{-1}	1	$\frac{5+2\sqrt{5}}{15} = 0.63$	$\frac{5\sqrt{5}-10}{3} = 0.39$	$\sqrt{5}-2 = 0.23$

т. е. x всегда является гармоничным делением объема подстрочника N , в то время как y таковым не является.

Пример 1. В силу постановки задачи возможны $2^4 = 16$ вариантов системно гармоничных переводов. Пусть, например, $N = 60$, $G = c_1 = 0.62$, $W = c_3 = 0.46$.

$$\text{Тогда } x = [90 - 30\sqrt{5}] = [22.91], \quad y = [300 - 120\sqrt{5}] = [31.67].$$

Другими словами, если при $N = 60$ перевод характеризуется параметрами $x = 23$ и $y = 32$, то перевод системно гармоничен, так как в этом случае получаем $G = 0.62$ и $W = 0.46$.

Примеры. Обратимся теперь к конкретным примерам поэтических переводов с немецкого языка на русский язык, выполненных как профессионалами, так и переводчиками-любителями.

И. Гете (1749–1832). «Ночная песня странника». Классический пример вольного перевода в русской поэзии – это «Ночная песня странника» Гете [14, с. 85] в переводе Лермонтова [15, с. 348]. Мы дополним этот перевод еще тремя переводами, принадлежащими выдающемуся поэту Анненскому, новосибирскому поэту Иванову [16, с. 145] и профессору, зав. кафедрой химии СГУПС (Новосибирск) Кутолину [17].

В отличие от перевода Лермонтова, последние три отличаются меньшей степенью вольности и обладают системными свойствами, которые станут понятными при дальнейшем изложении. Приведем все четыре перевода.

Wandrer's Nachtlied

Über allen Gipfeln
Ist Ruh,
In allen Wipfeln
Spürest du
Kaum einen Hauch;
Die Vögelein
schweigen in Walde.
Warte nur, balde
Ruhest du auch.

1780 г.

Подстрочник

Над всеми вершинами гор
Покой.
Во всех вершинах деревьев
едва
едва ощущается
дуновение.
Птички молчат в лесу.
Лишь подожди и скоро
ты отдохнешь тоже.

Из Гете

Горные вершины
Спят во тьме ночной;
Тихие долины
Полны свежей мглой;
Не пылит дорога,
Не дрожат листья...
Подожди немного,
Отдохнешь и ты.

Пер. М. Лермонтова

1840 г.

Из Гете (Подобное)

Над вершинами покой,
 Ни дуновения,
 Ни пенья птиц в тиши
 лесной...
 Чуть-чуть терпения
 И час наступит твой
 успокоения.

*Пер. К. Иванова
 6 февраля 1971 г.*

Над высью горной
 Тишь.
 В листве, уж черной,
 Ни дуновения.
 В чаще затих полет...
 О, подожди! Мгновенье
 Тишь и тебя ... возьмет.

*Пер. И. Анненского
 Между 1904–1909 гг.*

На вершинах кругом
 Тишина.
 И в листве
 Затаилась она.
 Трепетно едва.
 Птичий хор угас.
 Жди. И смертный час
 Успокоит Душу.

*Пер. С. Кутолина
 1977 г.*

Следует сказать, что данное стихотворение Гете явилось прямо-таки полигоном для состязания в мастерстве перевода. Стилетметрический анализ четырех приведенных выше переводов, пополненный переводами Брюсова и Пастернака (мы их не приводим, их можно найти в Интернете), сравнительно несложен и представлен в следующей таблице.

«Wandrer's Nachtlied» $N = 14$	Параметры		Коэффициенты		R
	x	y	G	W	$R = G / W$
Лермонтов	10	13	$4/14=0.29$	$13/17=0.76$	0.3736
Иванов	9	7	$5/14=0.36$	$7/12=0.58$	0.6122
Анненский	8	7	$6/14=0.43$	$7/13=0.54$	0.7959
Кутолин	8	9	$6/14=0.43$	$9/15=0.60$	0.7143
Брюсов	7	6	$7/14=0.50$	$6/13=0.46$	1.0843
Пастернак	10	12	$4/14=0.29$	$12/16=0.75$	0.3809

Перевод Лермонтова проанализирован Гаспаровым в работе [1], где он приводит примерно те же коэффициенты G и W , а по поводу перевода в целом пишет, что «собственно переводом здесь можно считать только первую и две последние строчки, все остальное – свободные вариации Лермонтова на тему Гете».

В переводе Иванова оригиналу точно соответствуют 5 слов: Gipfel, Ruhe, Rauch, Vögelein, Walde, поэтому $G = 5 / 14 = 0.36$, в то время как показатель вольности равен $W = 7 / 12 = 0.58$. Таким образом, хотя перевод и вольный (Иванов назвал свой перевод «Подобное»), но вольность его меньше, чем у Лермонтова.

Показатель качества перевода $R = G / W$ с точки зрения вольности у Иванова выше, чем у Лермонтова. Это ощущается и на интуитивном уровне. Просто Лермонтов в данном случае создал не перевод, а самостоятельное произведение, позаимствовав тему у Гете.

Как в переводе Иванова, так и в двух последующих мы обнаруживаем в качестве коэффициентов G и W системно гармонические константы или

близкие к ним. Отмечу также, что на рубеже 2000-х годов я работал с Кутолиным Сергеем Алексеевичем в одном вузе, был с ним знаком и опубликовал в редактируемом им сборнике работу по золотому сечению [18, с. 24–60]. Вот что он пишет в работе [17] о переводах вообще и о переводе Анненского в частности [20, с. 665]:

«Обычно восхищаются переводами Маршака... Но Маршак в переводах Бернса меняет строфику, размер и даже выпускает образы, которые, по справедливому замечанию В. Левика, “принято считать стержневыми”. По существу это означает не перевыражение образов оригинала, а явно выраженный элемент самотворчества, который, вообще говоря, следует именовать не “методом Маршака”, а “методом Лермонтова”! (вспомним также пример перевода Маршаком 49-го сонета Шекспира [4, с. 244]. – Авт.) [...]».

Тем не менее возможен в любом случае в силу синэргизма человеческого мышления языка такой аутентичный перевод, который учитывал и передавал бы в интуитивном восприятии образа подлинника грамматические, лексические и фонетические особенности на языке перевода. [...]. Своего рода подтверждением этой мысли может служить перевод того же стихотворения Гете И. Анненским (1909).

Что касается переводов Брюсова и Пастернака, то здесь тоже все предельно ясно. Брюсов тяготеет к точной передаче подстрочника, а следовательно, и оригинала (об этом пишет и Гаспаров [1, с. 363]), в то время как Пастернак, подобно Лермонтову, создает новое стихотворение на тему Гете. Перевод Брюсова близок к системной гармонии, а перевод Пастернака – нет.

В заключение отметим, что уже в этом простом примере возникают трудности при подсчете знаменательных слов в подстрочнике. В первую очередь это касается наречий. Например, в рассматриваемом случае мы сочли слова подстрочника *только* (nur) и *также* (auch) частицей и союзом соответственно. Как в этом, так и в других подобных случаях часто бывает трудно определить, относится ли данное слово к наречию или нет. Это одно из уязвимых мест методики Гаспарова.

Г. Гейне (1797–1856). «Сосна». Рассмотрим теперь стихотворение Гейне «Ein Fichtenbaum» в переводах Лермонтова и Тютчева и проведем их анализ:

Ein Fichtenbaum

Ein Fichtenbaum steht
einsam
Im Norden auf kahler Höh.
Ihn schläfert. Mit weißer
Decke
Umhüllen ihn Eis und
Schnee.
Er träumt von einer Palme,
die fern im Morgenland
einsam
und schweigend trauert
auf brennenden Felsenwand.

H. Heine

Сосна

На севере диком стоит
одинок
На голой вершине сосна.
И дремлет, качаясь, и сне-
гом сыпучим
Одета, как ризой, она
И снится ей все, что пу-
стыне далекой
В том крае, где солнца
восход
Одна и грустна на утесе
горючем
Прекрасная пальма растет.

Пер. М. Лермонтова

В чужой стороне

На севере мрачном,
на дикой скале
Кедр одинокий под снегом
Белеет
И сладко заснул он
в инистой мгле,
И сон его вьюга лелеет.
Про юную пальму все
снится ему
Что в дальних пределах
Под пламенным небом,
на знойном холму
Стоит и цветет одиноко.

Пер. Ф. Тютчева

Результаты анализа представленных переводов показаны в следующей таблице.

«Ein Fichtenbaum» $N = 21$	Параметры		Коэффициенты		R -отношение
	x	y	G	W	$R = G / W$
Лермонтов	8	11	13/21=0.62	11/24=0.46	1.3506
Тютчев	14	20	7/21=0.33	20/27=0.74	0.4500

Обратим внимание на то, что коэффициенты G и W Лермонтова являются гармоническими константами, в то время как у Тютчева это не так. Вообще говоря, коэффициенты Гаспарова на практике могут принимать любые значения, ограничений здесь нет, но для нас важно подчеркнуть, что они могут быть и системно гармоническими, что и подтвердил перевод Лермонтова.

Стилеметрические данные по корпусу 36 переводов 24 стихотворений. В табл. 1 перечислены 24 проанализированных стихотворения, системные характеристики которых представлены в приводимых ниже табл. 2–4.

Таблица 1

Перечень рассмотренных стихотворений

	Автор	Стихотворение	Переводчик	Источник
1	Рильке	«Пантера»	Карельский	[19, с. 81]
2		«Осенний день»		[19, с. 76]
3		«Предчувствие»		[19, с. 80]
4		«На сон грядущий»		[19, с. 72]
5		«За чтением»		[19, с. 75]
6		Шторм		«Гиацинты»
7	Гейне	«Лорелея»	Левик	[23, с. 52]
8		«Цветок лотоса»		[23, с. 382]
9		«Сверкало зыбью золотой»		[23, с. 57]
10		«Двойник»		[23, с. 59]
11		«Вы, право, не убили»		[23, с. 121]
12		«Старая роза»		[23, с. 288]
13	Гете	«Певец»	Карельский	[19, с. 5]
14	Эйхендорф	«Прощание»		[19, с. 11]
15	Мерике	«Моя река»		[19, с. 21]
16		«Она идет!»		[19, с. 23]
17	Фонтане	«Полдень»		[19, с. 25]
18	Георге	«Взгляни на парк»		[19, с. 61]
19	Ленау	«Привет весны»	Левик	[21, с. 691]
20		«Песни в камышах, 1»		[21, с. 686]
21		«Песни в камышах, 2»		[21, с. 686]
22		«Песни в камышах, 3»		[21, с. 686]
23		«Песни в камышах, 4»		[21, с. 687]
24		«Песни в камышах, 5»		[21, с. 687]

Переводы выдающегося германиста, крупнейшего переводчика Карельского и не менее знаменитого поэта-переводчика Левика заимствованы из работ [19] и [21–23] соответственно. Оригинальные тексты стихов Рильке, Гейне и других поэтов – из работ [21], [24] и [25], а также из интернет-источников.

Поясним нумерацию стихов в табл. 2–4. Переводы Григорьева стихов 1–6 и 7–12 (они не опубликованы) соответствуют переводам стихов 1–6 Карельского и стихов 7–12 – Левика в табл. 3 и 4 соответственно. Стихи 13–18 представлены переводами Карельского в табл. 3, а стихи 19–24 – переводами Левика в табл. 4. Переводы стихов 1–12 разными авторами позволяет сравнивать эти переводы между собой.

Таблица 2

Системные характеристики переводов Григорьева

	Автор	Стихотворение	Параметры	Коэффициенты	$R = G / W$
			$N \quad x \quad y$	$G \quad W$	
1	Рильке	«Пантера»	42 20 20	0.52 0.48	1.1000
2		«Осенний день»	53 31 32	0.41 0.59	0.7005
3		«Предчувствие»	37 16 19	0.57 0.47	1.1949
4		«На сон грядущий»	51 22 26	0.57 0.47	1.2028
5		«За чтением»	122 58 55	0.52 0.46	1.1350
6		«Гиацинты»	60 28 24	0.53 0.43	1.2444
7	Шторм	«Лорелея»	62 29 37	0.53 0.53	1.0070
8	Гейне	«Цветок лотоса»	29 11 16	0.62 0.47	1.3190
9		«Сверкало зыбью золотой»	47 24 21	0.49 0.48	1.0253
10		«Двойник»	47 23 20	0.51 0.45	1.1234
11		«Вы, право, не убили»	20 14 10	0.30 0.62	0.4800
12		«Старая роза»	59 38 28	0.36 0.57	0.6223

Таблица 3

Системные характеристики переводов Карельского

	Автор	Стихотворение	Параметры	Коэффициенты	$R = G / W$
			$N \quad x \quad y$	$G \quad W$	
1	Рильке	«Пантера»	42 19 20	0.55 0.46	1.1774
2		«Осенний день»	53 25 27	0.53 0.49	1.0762
3		«Предчувствие»	37 22 27	0.40 0.64	0.6306
4		«На сон грядущий»	51 20 24	0.61 0.44	1.3930
5		«За чтением»	122 64 64	0.47 0.52	0.9062
6	Шторм	«Гиацинты»	60 39 39	0.35 0.65	0.6323
13	Гете	«Певец»	123 56 45	0.54 0.40	1.3557
14	Эйхендорф	«Прощание»	85 46 36	0.46 0.48	0.9559
15	Мерике	«Моя река»	116 74 67	0.36 0.61	0.5890
16		«Она идет!»	29 18 12	0.38 0.52	0.7270
17	Фонтане	«Полдень»	28 14 13	0.50 0.48	1.0385
18	Георге	«Взгляни на парк»	53 25 19	0.53 0.40	1.3068
			122 58 55	0.52 0.46	1.1350
7	Гейне	«Лорелея»	62 29 30	0.53 0.48	1.1117
8		«Цветок лотоса»	29 12 15	0.59 0.47	1.2506
9		«Сверкало зыбью золотой»	47 26 26	0.45 0.55	0.8077
10		«Двойник»	47 27 19	0.42 0.49	0.8735
11		«Вы, право, не убили»	20 14 13	0.30 0.68	0.4385
12		«Старая роза»	59 35 37	0.41 0.61	0.6706
19	Ленау	«Привет весны»	36 17 9	0.53 0.32	1.6420
20		«Песни в камышах, 1»	43 26 25	0.39 0.59	0.6642
21		«Песни в камышах, 2»	24 9 11	0.62 0.42	1.4773
22		«Песни в камышах, 3»	34 21 16	0.38 0.55	0.6930
23		«Песни в камышах, 4»	28 13 13	0.54 0.46	1.1538
24		«Песни в камышах, 5»	38 18 16	0.53 0.44	1.1842

Таблица 4

Системные характеристики переводов Левика

	Автор	Стихотворение	Параметры	Коэффициенты	$R = G / W$	
			$N \quad x \quad y$	$G \quad W$		
7	Гейне	«Лорелея»	62 29 30			
8		«Цветок лотоса»	29 12 15	0.53 0.48	1.1117	
9		«Сверкало зыбью золотой»	47 26 26	0.59 0.47	1.2506	
10		«Двойник»	47 27 19	0.45 0.55	0.8077	
11		«Вы, право, не убили»	20 14 13	0.42 0.49	0.8735	
12		«Старая роза»	59 35 37	0.30 0.68	0.4385	
19		Ленау	«Привет весны»	36 17 9	0.41 0.61	0.6706
20			«Песни в камышах, 1»	43 26 25	0.53 0.32	1.6420
21			«Песни в камышах, 2»	24 9 11	0.39 0.59	0.6642
22			«Песни в камышах, 3»	34 21 16	0.62 0.42	1.4773
23			«Песни в камышах, 4»	28 13 13	0.38 0.55	0.6930
24	«Песни в камышах, 5»		38 18 16	0.54 0.46	1.1538	
				0.53 0.44	1.1842	

Представленные в табл. 2–4 результаты проанализированы в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Стихи, системно гармоничные по отношению $R = G / W$ (нумерация стихов согласно табл. 2–4)

	$R = G / W$			Переводчики		
	Определение	Выражение	Значение	Григорьев	Карельский	Левик
1	$\frac{\phi}{1-\phi}$	$= \frac{1+\sqrt{5}}{2}$	1.6180			19
2	$\frac{\Phi/3}{1-\phi}$	$= \frac{2+\sqrt{5}}{3}$	1.4120		4	
3	$\frac{\phi}{1-\Phi/3}$	$= \frac{3\sqrt{5}}{5}$	1.3416	8	13	

Окончание табл. 5

	$R = G / W$			Переводчики		
	Определение	Выражение	Значение	Григорьев	Карельский	Левик
4	$\frac{1-\Phi/3}{1-\phi}$	$= \frac{5+\sqrt{5}}{6}$	1.2060	3,4		
5	$\frac{\Phi/3}{1-\Phi/3}$	$= \frac{5+3\sqrt{5}}{10}$	1.1708	1	1	24
6	$\frac{\phi}{\Phi/3}$	$= \frac{9-\sqrt{5}}{2}$	1.1459	5		23
			1.0	7,9	2,17	
7	$\frac{\Phi/3}{\phi}$	$= \frac{3+\sqrt{5}}{6}$	0.8727			10
8	$\frac{1-\Phi/3}{\Phi/3}$	$= \frac{-5+3\sqrt{5}}{2}$	0.8541			
9	$\frac{1-\phi}{1-\Phi/3}$	$= \frac{15-3\sqrt{5}}{10}$	0.8292			9
10	$\frac{1-\Phi/3}{\phi}$	$= \frac{\sqrt{5}}{3}$	0.7453		16	
11	$\frac{1-\phi}{\Phi/3}$	$= \frac{-6+3\sqrt{5}}{1}$	0.7082	2		22
12	$\frac{1-\phi}{\phi}$	$= \frac{-1+\sqrt{5}}{2}$	0.6180	12	3, 6, 15	

Таблица 6

Переводы, гармоничные или близкие к гармоничным по одному из коэффициентов G или W , а также один системно негармоничный перевод Левика «Вы, право, не убили» (выделено курсивом): нумерация стихов согласно табл. 2–4

	Григорьев			Карельский			Левик	
	(G, W)	R		(G, W)	R		(G, W)	R
6	(0.53, 0.43)	1.2444	5	(0.47, 0.52)	0.9062	7	(0.53, 0.48)	1.1177
10	(0.51, 0.45)	1.1234	14	(0.46, 0.48)	0.9559	8	(0.59, 0.47)	1.2506
11	(0.30, 0.62)	0.4800	18	(0.53, 0.40)	1.3068	11	<i>(0.30, 0.68)</i>	<i>0.4385</i>
						12	(0.41, 0.61)	0.6706
						20	(0.39, 0.59)	0.6642
						21	(0.62, 0.42)	1.4773

Табл. 5 организована следующим образом. В качестве системообразующих констант примем четыре гармонические константы $\phi = 0.62$, $G^* = 0.54$,

$W^* = 0.46$ и $1 - \phi = 0.38$. Различные комбинации их R -отношений приводят к 12 возможным значениям, которые в порядке убывания перечислены в первых столбцах табл. 5. В трех последних столбцах этой таблицы номерами из табл. 2–4 представлены стихи, наиболее близкие по своим R -отношениям к одному из 12 «типовых» R -отношений. Скажем, перевод 8 Григорьева («Цветок лотоса» Гейне) имеет R -отношение, наиболее близкое к $R_3 = 1.3416$ (так как $|G/W - R_3| = 0.0227$), что соответствует коэффициенту точности $G = \phi = 0.62$ и коэффициенту вольности $W = 1 - \Phi / 3 = 0.46$. Этот результат с небольшой погрешностью мы и наблюдаем в 8-й строке табл. 2.

В табл. 5 представлена также строка, соответствующая R -отношению $R = 1$, возникающему при равных коэффициентах точности G и вольности W . Это случай гармонии, соответствующий дихотомии. Таким образом, согласно табл. 5 имеем $9 + 9 + 6 = 24$ системно гармоничных перевода. С учетом погрешностей вычислений, связанных со специфическими сложностями методики, это достаточно высокий результат. Отметим также, что среди 13 возможных R -инвариантов для 36 рассмотренных переводов не встретилось ни одного системно гармоничного перевода с R -инвариантом $R_8 = 0.8541$.

Теперь обратимся к табл. 6. В ней представлены оставшиеся $36 - 24 = 12$ переводов, из которых 11 оказались системно гармоничными по одному параметру либо по коэффициенту точности, либо по коэффициенту вольности. Смысл ее совершенно прозрачен: для каждого перевода в ней указана соответствующая ему пара (G, W) , в которой один из элементов обязательно является гармонической константой или величиной, очень близкой к одной из них. Лишь один перевод Левика «Вы, право, не убили» оказался в этом отношении непоказательным.

По этому поводу заметим, что это достаточно короткое стихотворение (объем подстрочника равен $N = 20$) имеет минимальное количество знаменательных слов из всех 12 переводов Левика. Это могло послужить причиной нарушения системной гармонии, так как имеет место известный феномен: в очень маленьких стихотворениях всегда наблюдаются высокие значения параметров x и y , что и приводит к несистемным значениям элементов пары (G, W) .

Теодор Шторм. «Гиацинты» Прежде чем перейти к заключительной части статьи, рассмотрим пример, показывающий, что координаты вектора (G, W) могут весьма существенно изменяться при, казалось бы, незначительном изменении параметров x и y .

Для пояснения феномена чувствительности (G, W) к изменениям x и y рассмотрим стихотворение Шторма «Гиацинты» и два его перевода, один из которых выполнен мною, а второй – Карельским. Перевод «Гиацинтов» приводится в работах [19] и [26]. Это позволит показать, что системные закономерности перевода возникают в значительной степени вне зависимости от эстетического уровня перевода, а по совершенно другим причинам. Вот эти два перевода:

Гиацинты

Чуть слышен танцев дальних звук
ночной.
Дремотою цветы хотят меня объять.
Не спится мне, весь в думах я с тобой;
Но все равно должна ты танцевать.

Звучит без устали мотив. Одна
Ты. Скрипок плач, пылают в зале свечи,
Мелькают в вихре танца лица, плечи.
Все в пламени огня, но ты бледна.

Должна ты танцевать; тебя ласкает
Чужих объятий страсть. Их сбрось
с себя!
Твой белый шлейф..., он мимо
пролетает.
То образ твой. Гляжу я на тебя.

Струится запах все сильней ночной
Цветов, меня стремящийся объять.
Не спится мне, весь в думах я с тобой;
Но все равно должна ты танцевать.

Пер. Ю. Григорьева

Там бал в разгаре; здесь темнеет сад,
Здесь душной дремой ночь меня
объяла.
А думы все с тобой, я им не рад;
Заснуть бы мне, но ты царица бала.

Там суета да кончится ль она?
Как свечи там слепят, как стонут
скрипки.
Смешались пары, вздохи и улыбки,
Горячкой пышет зал; но ты бледна.

Царица бала... Рук чужих объятья
Тебя влекут, кружат под вой смычка.
О берегись! В воздушном этом платье
Так беззащитна ты и так хрупка!

Густеет мгла, благоухает сад.
Дурманом ночь меня околдовала.
А думы все с тобой, я им не рад;
Заснуть бы мне, но ты – царица бала.

Пер. А. Карельского

Системные характеристики переводов Григорьева и Карельского соответственно имеют вид

$$(G, W) = (0.57, 0.46), \quad R = 1.2310, \quad (G, W) = (0.35, 0.65), \quad R = 0.6323.$$

На первый взгляд перевод Григорьева более гармоничен, чем перевод Карельского, однако это не совсем так. Как уже отмечалось, коэффициенты Гаспарова оценивают не эстетичность перевода в чистом виде, а его системную организованность, так как параметры x и y хотя и несут информацию о содержании стихотворения, но весьма одностороннюю. Они, повторяем, отражают лишь системные свойства конкретной знаковой системы вне ее содержания.

С другой стороны, переводчик волен сознательно отклоняться от первоисточника, преследуя чисто эстетические цели. Это как раз и влияет на системные характеристики. Проведем мысленный эксперимент. В подлиннике у Шторма трижды повторяется фраза «*du mußt tanzen*», что означает «ты должна танцевать». Однако Карельский опускает эти слова, используя вместо них фразу «ты – царица бала». Если бы Карельский сохранил слова Шторма, то каждый из параметров перевода x и y уменьшился бы на три единицы. В итоге мы получили бы вектор $(G, W) = (0.45, 0.55)$ и R -инвариант $R = 0.8182$, близкий к $R_0 = 0.8292$ из табл. 5, и перевод оказался бы более гармоничным с системной точки зрения. В определенном смысле можно сказать, что Карельский, отклонившись от подлинника, написал стихотворение даже лучше самого Шторма, более образно передав его смысл.

Двойная системная гармония. Зададимся вопросом: а не слишком ли много среди рассмотренных переводов оказалось примеров, подчиняющихся полностью или частично указанной системной закономерности? Думается, что нет. Переводчик не работает с арифмометром, а переводит, руководствуясь внутренним эстетическим чувством. В этом смысле закономерность 54/46 вполне аналогична известной закономерности Парето 20/80 относительно значимости отдельных частей различных групп или множеств [27, с. 134].

Обобщенные коэффициенты Гаспарова. Будем рассматривать только случай $x = y$. Это означает, что в результате отображения $\phi: A \rightarrow B$ общее количество элементов в системе *подстрочник перевод* остается неизменным. В нашем случае из 36 переводов имеется всего пять стихотворений, для которых $x = y$. Но и этих примеров будет достаточно, чтобы увидеть некоторые интересные системные закономерности.

Обозначим $k := x = y$. Тогда

$$g = \frac{N-k}{N}, \quad w = \frac{k}{N} \quad (7)$$

– коэффициенты точности и вольности, являющиеся линейными функциями относительно k . Это приводит к мысли, что в качестве функций, описывающих g и w , могут быть выбраны любые выпуклые или вогнутые функции, монотонные на $[0, 1]$. Другими словами, измеряемая степень вольности или точности перевода не обязательно должна быть строго пропорциональна величине k . Важно лишь, чтобы сохранялась монотонность g и w относительно k .

Введение обобщенных коэффициентов позволяет улавливать более тонкие признаки гармонии, возникающие при переводе.

Пример 2. Положим, $x = k/N$, и пусть

$$g(x) = 1 - x^\alpha, \quad w = x^\alpha, \quad \alpha > 0 \quad (8)$$

– обобщенные коэффициенты точности и вольности, определяемые степенной функцией. Очевидно, что при $\alpha = 1$ приходим к (7). Если $\alpha > 1$, то приходим к задаче распределения доходов, описываемой в теории социальных систем кривой Лоренца $L(x) = x^\alpha$ [13, с. 208], при этом для всех $k \in [0, N]$ получаем $g > G$ и $w < W$. При $\alpha < 1$ наблюдаются обратные неравенства, т. е. $g < G$ и $w > W$.

Пусть, например, $c_1, c_2 \in \{\phi, 1-\phi, G^*, W^*\}$ – некоторые гармонические константы. Тогда если $\alpha = \log c_2 / \log c_1$, то при $k = c_1 N$ одновременно выполняются равенства:

$$G = \frac{N-k}{N} = 1 - c_1, \quad W = \frac{k}{N} = c_1, \quad g = 1 - \left(\frac{k}{N}\right)^\alpha = 1 - c_2, \quad w = \left(\frac{k}{N}\right)^\alpha = c_2, \quad (9)$$

т. е. имеет место системная гармония в смысле Гаспарова и Лоренца, или двойная гармония.

Логарифмическая двойная гармония. Рассмотрим теперь более сложный случай так называемой *логарифмической гармонии*, когда в качестве g и w рассматриваются коэффициенты

$$g = \frac{N-k}{N} \frac{\log(N-k)}{\log N}, \quad w = 1 - g. \quad (10)$$

Легко проверить, что при фиксированном N величины g и w в (10) являются выпуклой и вогнутой функциями от k соответственно.

В нашем распоряжении среди 36 рассмотренных переводов имеется пять стихотворений с $x = y$. Их эмпирический анализ показал, что и в этом случае при некоторых значениях k возникает двойная гармония. Более того, оказалось, что в ряде случаев таких значений k может быть несколько. Соответствующие результаты представлены в табл. 7.

Таблица 7

Значения k для пяти стихотворений с $x = y$, при которых возникает двойная или близкая к ним логарифмическая гармония

	Стихотворение			k	Коэффициенты	
	Автор	Название	Переводчик		(G, W)	(g, w)
1	Рильке	«Пантера»	Григорьев	16	(0.62, 0.38)	(0.54, 0.46)
				19*	(0.55, 0.45)	(0.46, 0.54)
2	Ленау	«Песни в камышах, 4»	Левик	13*	(0.54, 0.46)	(0.44, 0.56)
3	Гейне	«Сверкало зыбью золотой»	Левик	18	(0.62, 0.38)	(0.54, 0.46)
				21	(0.55, 0.45)	(0.47, 0.53)
				25	(0.47, 0.53)	(0.38, 0.62)
				26*	(0.45, 0.55)	(0.38, 0.62)
4	Шторм	«Гиацинты»	Карельский	23	(0.62, 0.38)	(0.54, 0.46)
				32	(0.47, 0.53)	(0.38, 0.62)
				33*	(0.45, 0.55)	(0.36, 0.64)
5	Рильке	«За чтением»	Карельский	46	(0.62, 0.38)	(0.56, 0.44)
				48	(0.61, 0.39)	(0.54, 0.46)
				57	(0.53, 0.47)	(0.46, 0.54)
				64*	(0.47, 0.52)	(0.40, 0.60)
				66	(0.46, 0.54)	(0.38, 0.62)

Что же мы видим? В табл. 7 без звездочек обозначены те значения k , которые соответствуют двойной гармонии, а со звездочками отмечены те значения k , которые имеют место в реально выполненных переводах. Отсюда видим, что мой перевод ($k = 19^*$) и оба перевода Левика ($k = 13^*$ и $k = 26^*$) являются дважды гармоничными.

А что же с переводами Карельского? И здесь тоже практически все в порядке. В «Гиацинтах» Карельского имеем $k = 39$, но с учетом замечания относительно фразы «но ты – царица бала» он имел бы $k = 33$, что практически совпадает с указанным в табл. 7 значением $k = 32$. В реальном переводе Карельского стихотворения «За чтением» имеем $k = 64^*$, что также всего на две единицы отличается от указанного в табл. 7 оптимального значения $k = 66$.

В заключение приведем два перевода «Пантеры» Рильке, выполненных мною и Карельским [19, с. 81; 26, с. 77]. Оба перевода системно гармоничны, но второй из них не попал в табл. 7 в силу того, что для него $x \neq y$. Однако это не мешает ему быть исключительно совершенным в эстетическом плане. Вот эти переводы:

Пантера

Вдоль прутьев взгляд ее скользит устало,
нет у нее как будто больше сил,
что там за сталью прутьев где-то стало,
ей все равно – мир для нее застыл.

Упругий мягкий шаг ее не слышен,
в спираль кругов он в центре клетки свит;
он танцем силы приглушенной дышит,
от всех в котором сгусток воли скрыт.

Порой зрачков завесу поднимает
она беззвучно; мыслится тогда:
нерв тишины в тот миг ее пронзает
и в сердце остается навсегда.

Пер. Ю. Григорьева

Глазам усталым – где передохнуть им?
Как удержать хоть малой вещи след?
Исполосован взгляд миллионом прутьев,
и за миллионом прутьев мира нет.

Упругий шаг бесшумных лап звериных,
что здесь в пространстве крохотном
кружит,
как вечный танец силы вокруг середины,
где воля укрощенная лежит.

Лишь иногда расширится мгновенно
зрачок
и отраженье вглубь войдет,
пройдет по напряженно ждущим членам
и в сердца глубине умрет.

Пер. А. Карельского

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный стилеметрический анализ конкретных переводов не претендует на истину в последней инстанции. Он лишь намечает направление, в котором, возможно, следует двигаться в том числе и для того, чтобы понять, в чем, собственно, состоят красота, обаяние и полноценность перевода. Автор понимает, что чисто механический анализ семиотических систем, примером которых являются стихи, не может дать полной картины сложности процесса перевода. Тем не менее некоторые из полученных результатов показали автору достаточно интересными.

Системные исследования теории перевода можно распространить на такие известные системные закономерности, как целостность и аддитивность. «Поскольку абсолютная целостность и абсолютная аддитивность не более чем абстракция, то реальные системы находятся в смысле этих категорий где-то в промежуточной точке на оси целостность – аддитивность» [3, с. 103].

Как у Качалы [3, с. 105], так и у Гарбовского [4, глава 3] речь, в частности, идет о категориях *иерархичности* и *коммуникативности*, только у первого они рассматриваются в общем виде, а у второго – применительно к теории перевода. С точки зрения теории перевода можно было бы более подробно обратиться и к другим системным категориям, но хотелось бы как в этом, так и в других случаях привлечь для этого соответствующий математический инструмент, что мы и попробовали сделать в данной статье. Будем надеяться, что реализация этой идеи – дело ближайшего будущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаспаров М.Л.* О русской поэзии: анализы, интерпретации, характеристики. – СПб.: Азбука, 2001. – 480 с.
2. *Федоров А.В.* Основы общей теории перевода: (лингвистические проблемы): учебное пособие для институтов и факультетов иностранных языков. – М.: Высшая школа, 1983. – 303 с.
3. *Качала В.В.* Основы теории систем и системного анализа: учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 216 с.
4. *Гарбовский Н.К.* Теория перевода: учебник. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. – 544 с.
5. *Шиханович Ю.А.* Введение в современную математику. – М.: Наука, 1965. – 376 с.
6. *Ряпина Т.В.* Лингво-семиотический анализ поэтического текста при переводе (на материале немецких и польских переводов И. Бродского): автореф. дис. ... канд. филол. наук. – М., МГУ, 2008. – 25 с.
7. *Сороко Э.М.* Золотые сечения, процессы самоорганизации и эволюции систем: введение в общую теорию гармонии систем. – Изд. 2-е. – М.: КомКнига, 2006. – 264 с.
8. *Шубников А.В., Копчик В.А.* Симметрия в науке и искусстве. – 3-е изд. – М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2004. – 560 с. – (Математика и механика).
9. *Эшби У.Р.* Введение в кибернетику. – М.: ИЛ, 1959. – 432 с.
10. *Биркгофф Г.* Математика и психология. – М.: Советское радио, 1977. – 96 с.
11. *Bense M.* Einführung in die informationstheoretische Ästhetik. – Reinbek b. Hamburg: Rowohlt, 1969.
12. *Birkhoff G.D.* Aesthetic measure. – Cambridge, MA: Harvard University Press, 1933.
13. *Григорьев Ю.Д., Мартыненко Г.Я.* Последовательности типа Фибоначчи: теория и прикладные аспекты. – СПб.: Лань, 2017. – 516 с.
14. *Гете И.В.* Избранная лирика (на немецком языке). – М.: Прогресс, 1980. – 504 с.
15. *Лермонтов М.Ю.* Сочинения. Т. 1. – М.: Художественная литература, 1970. – 768 с.
16. *Иванов К.* Избранные стихотворения. – Новосибирск: Издатель, 1998. – 352 с.
17. *Кутолин С.А.* Интуиция как семиотический образ (на примере переводов поэзии) // Кутолин С.А. Концепции современного естествознания. – Новосибирск: Chem Lab. NCD, 2000. – 117 с.
18. *Григорьев Ю.Д.* Математика эйдоса золотого сечения // Химический дизайн: мета-языки в науке и рефлексия естествознания. – Новосибирск: Chem Lab. NCD, 2003. – С. 24–60.
19. *Немецкая и австрийская поэзия двух веков в переводах А. Карельского (1936–1993).* – М.: Медиум, 1993. – 128 с. – Загл. обл.: Бог Нахтигаль.
20. *Золотое перо: немецкая, австрийская и швейцарская поэзия в русских переводах, 1812–1970.* – М.: Прогресс, 1974. – 736 с.
21. *Золотое сечение: австрийская поэзия XIX–XX вв. в русских переводах / сост. В.В. Вебера, Д.С. Давлианидзе.* – М.: Радуга, 1988. – 814 с.
22. *Левик В.* Избранные переводы. В 2 т. – М.: Художественная литература, 1977. – 2 т.
23. *Гейне Г.* Избранные сочинения: пер. с нем. – М.: Художественная литература, 1989. – 702 с. – (Библиотека классики. Зарубежная литература).
24. *Рильке Р.* Лирика: сборник / сост. и предисл. А.В. Карельского. – М.: Прогресс, 1981. – 517 с. – На нем. яз.
25. *Heinrich H.* Buch der Lieder. – Hamburg, 2012.
26. *На полном скаку и другие произведения немецких и австрийских писателей в переводах Альберта Карельского.* – М.: Центр книги Рудомино, 2016. – 704 с. – (Мастера художественного перевода).
27. *Прангишвили И.В.* Энтропийные и другие системные закономерности: вопросы управления сложными системами. – М.: Наука, 2003. – 428 с.

Григорьев Юрий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета («ЛЭТИ») им. В.И. Ленина. Основные направления научных исследований: планирование эксперимента, актуарная математика и теория риска, математическая теория гармонии. Имеет более 130 публикаций, в том числе четыре монографии. E-mail: yuri_grigoriev@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-79-102

System harmony of poetic text translation*

YU. D. GRIGORIEV

St.-Petersburg State Electrotechnical University, 5, A. Popov Street, St. Petersburg, 197376, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: yuri_grigoriev@mail.ru

Based on the example of poetic text analysis while translating from German the system characteristics of translation as a process of superposition of one character system on another, namely interlinear crib on translation, are considered. These characteristics are accuracy and poetic license factors. Based on the translation analysis technique suggested by Gasparov the concept of system harmony functions is introduced. It generates along with known constants of the golden section $\varphi = 0.618$ and $\varphi^{-1} = \Phi = 1.618$ two other harmonious constants, $G^* = \Phi/3$ and $W^* = 1 - G^*$ which characterize the system properties of translation. The technique is based on counting notional words in the interlinear crib and translation. Methodological difficulties of using this technique are also noted. Thirty-six translations of 24 poems by well-known German poets including Goethe, Heine, Storm, Lenau, Rilke, Eichendorf, Merike, Fontane and George are analyzed. The poems are translated by A. Karelsky an outstanding translator from German and by W. Levik a famous poet-translator. For comparison with them from the system point of view translations made by the author of this article are also given. Based on the analysis made the conclusion is drawn that the system laws of translation do not greatly depend on an aesthetic level of translation. They characterize not so much this level, as the translation problem specificity itself. It is revealed that the greatest deviations of translations from system laws are observed in short poems. The class of poems with equal numbers of notional words in the interlinear crib and in translation is separately singled out. It is noticed that double system harmony can be observed in this case.

Keywords: Poetic accuracy and license factors, notional words, system approach, self-organizing system, systemic constants, measure of aesthetics, function of system harmony, stylemetric analysis, double system harmony, Gasparov's generalised factors

REFERENCES

1. Gasparov M.L. *O russkoi poezii: analizy, interpretatsii, kharakteristiki* [On a Russian poetry: analyses, interpretations, characteristics]. St. Petesburg, Azbuka Publ., 2001. 480 p.
2. Fedorov A.V. *Osnovy obshchei teorii perevoda: (lingvisticheskie problemy)* [Basis of the general theory of translation (linguistic problems)]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 303 p.
3. Kachala V.V. *Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza* [Foundations of the systems theory and the system analysis]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007. 216 p.
4. Garbovskii N.K. *Teoriya perevoda* [Theory of translation]. Moscow, MSU Publ., 2007. 544 p.
5. Shikhanovich Yu.A. *Vvedenie v sovremennuyu matematiku* [An Introduction to modern mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 376 p.
6. Ryapina T.V. *Lingvo-semioticheskii analiz poeticheskogo teksta pri perevode (na materiale nemetskikh i pol'skikh perevodov I. Brodskogo)*. Avtoref. diss. kand. filol. nauk [Lingvo-semiotics analysis of the poetic text by translating (on a material of German and Polish translations of I. Brodsky). Author's abstract of PhD philological sci. diss.]. Moscow, 2008. 25 p.
7. Soroko E.M. *Zoloty secheniya, protsessy samoorganizatsii i evolyutsii sistem: vvedenie v obshchuyu teoriyu garmonii sistem* [Golden sections, processes of self-organising and evolution of systems: Introduction to the general of harmony theory of systems]. 2th ed. Moscow, Komniga Publ., 2006. 264 p.
8. Shubnikov A.V., Koptsik V.A. *Simmetriya v nauke i iskusstve* [Symmetry at science and art]. Moscow, Izhevsk, Institute for computer research Publ., 2004. 560 p.

* Received 05 September 2017.

9. Ashby W.R. *An Introduction to cybernetics*. London, Charman and Hall LTD, 1956 (Russ. ed.: Eshbi U.R. *Vvedenie v kibernetiku*. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1959. 432 p.).
10. Birkhoff G. *Matematika i psikhologiya* [Mathematics and psychology]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977. 96 p. (In Russian).
11. Bense M. *Einführung in die informationstheoretische Ästhetik*. Reinbek b. Hamburg, Rowohlt, 1969.
12. Birkhoff G.D. *Aesthetic measure*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1933.
13. Grigor'ev Yu.D., Martynenko G.Ya. *Posledovatel'nosti tipa Fibonachchi: teoriya i prikladnye aspekty* [Sequences of Fibonacci's type: theory and applied aspects]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2017. 516 p.
14. Goethe J.W. *Izbrannaya lirika (na nemetskom yazyke)* [Selected lyrics (in German)]. Moscow, Progress Publ., 1980. 504 p.
15. Lermontov M.Yu. *Sochineniya*. T. 1 [Works. Vol. 1]. Moscow, Khudozhestvennaya literatura Publ., 1970. 768 p.
16. Ivanov K. *Izbrannye stikhotvoreniya* [Selected poems]. Novosibirsk, Izdatel' Publ., 1998. 352 p.
17. Kutolin S.A. Intuitsiya kak semioticheskii obraz (na primere perevodov poezii) [Intuition as a semiotics image (on an example of poetry translations)]. Kutolin S.A. *Kontseptsii sovremennogo estestvoznaniya* [Concepts of modern natural sciences]. Novosibirsk, Chem Lab. NCD Publ., 2000. 117 p.
18. Grigor'ev Yu.D. Matematika eidosa zolotogo secheniya [Mathematics of a golden section/eidos]. *Khimicheskii dizain: metazyki v nauke i refleksiya estestvoznaniya* [Chemical design: metalanguages in a science and natural sciences reflexion]. Novosibirsk, Chem Lab. NCD Publ., 2003, pp. 24–60.
19. *Nemetskaya i avstriiskaya poeziya dvukh vekov v perevodakh A. Karel'skogo (1936–1993)* [German and Austrian poetry of two centuries in A. Karelsky's (1936–1993) translations]. Moscow, Medium Publ., 1993. 128 p.
20. Zolotoe pero: nemetskaya, avstriiskaya i shveysarskaya poeziya v russkikh perevodakh, 1812–1970 [Gold pen. German, Austrian and Swiss poetry in Russian translations. 1812–1970]. Moscow, Progress Publ., 1974. 736 p.
21. Veber V.V., Davlianidze D.S., comp. *Zolotoe sechenie: avstriiskaya poeziya XIX–XX vv. v russkikh perevodakh* [Golden section. Austrian poetry of XIX–XX centuries in Russian translations]. Moscow, Raduga Publ., 1988. 814 p.
22. Levik V. *Izbrannye perevody*. V 2 t. [Selected translations. In 2 vol.]. Moscow, Khudozhestvennaya literatura Publ., 1977.
23. Heine H. *Izbrannye sochineniya* [Selected works]. Moscow, Khudozhestvennaya literatura Publ., 1989. 702 p. (In Russian).
24. Rilke R. *Lirika*. [Lirika]. Comp. A.V. Karelsky. Moscow, Progress Publ., 1981. 517 p. (In German).
25. Heinrich H. *Buch der Lieder*. Hamburg, 2012.
26. *Na polnom skaku i drugie proizvedeniya nemetskikh i avstriiskikh pisatelei v perevodakh Al'berta Karel'skogo* [On full jump and other works of German and Austrian writers in Albert Karelsky's translation]. Moscow, Tsentr knigi Rudomino Publ., 2016. 704 p.
27. Prangishvili I.V. *Entropiinye i drugie sistemnye zakonomernosti: voprosy upravleniya slozhnyimi sistemami* [Entropic and other system laws: control questions by complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 428 p.

Для цитирования:

Григорьев Ю.Д. Системная гармония перевода поэтических текстов // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 79–102. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-79-102.

For citation:

Grigoriev Yu.D. Sistemnaya garmoniya perevoda poeticheskikh tekstov [System harmony of poetic text translation]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 79–102. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-79-102.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERIN
AND CONTROL

УДК 007.52

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-103-116

Методика разработки программы управления роботом для робота-манипулятора Delta *

Д.С. КОЛТЫГИН¹, И.А. СЕДЕЛЬНИКОВ²

¹ 665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: kds@brstu.ru

² 665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет, доцент. E-mail: Ohtargil@yandex.ru

В статье рассмотрен вопрос разработки программного обеспечения для роботов-манипуляторов на примере робота-манипулятора Delta. Предложена методика и алгоритмы проектирования программного обеспечения для роботов-манипуляторов не требующая больших затрат по времени и дополнительного специализированного программного обеспечения. Обоснована причина создания данного программного обеспечения, описана его структура и структура его модулей. Представлены алгоритмы ручного и автоматического управления, а также алгоритм управления с помощью линейных пространственных координат вместо угловых координат робота.

В качестве основы для разработки выбран язык программирования Visual Basic (Visual Studio 2013) корпорации Microsoft. При создании программы использовалось как можно меньше специальных библиотек и других программных компонентов, что даёт большую универсальность при применении обновлений. В статье приведены обобщенная функциональная схема робототехнического комплекса, алгоритм разработки программы управления, структурная схема программного обеспечения Delta v. 1.0, алгоритмы ручного и автоматического управления, а также формы программы для различных режимов работы. В качестве примера показаны фрагменты кода таких функций, как работа с изображением, цикловая обработка, автоматическое управление. В результате были исправлены некоторые недостатки существующей программы, созданы новые режимы работы и новые команды, которые расширяют возможности управления роботами. Программа позволяет строить сложные задачи, включающие в себя циклы, множественные повторы и динамические переходы к различным частям управляющей программы. Получена база для создания новых функций и программ управления роботами.

Ключевые слова: программирование роботов, робот, робототехника, программа, манипулятор, система управления, методы, алгоритм

ВВЕДЕНИЕ

Современные роботы и робототехнические комплексы (РТК) продолжают совершенствоваться, происходит развитие всех их составляющих, к ним относятся в основном механика и кинематика, системы управления, программы управления (рис. 1).

* Статья получена 29 сентября 2017 г.

Очевидно, что развитие систем и программ управления за последнее время намного существеннее, чем изменения в механике и кинематике современных роботов. За последние 20 лет механические роботы не потерпели особых изменений, чего нельзя сказать о системах управления и программном обеспечении (ПО) в данной области и в целом.

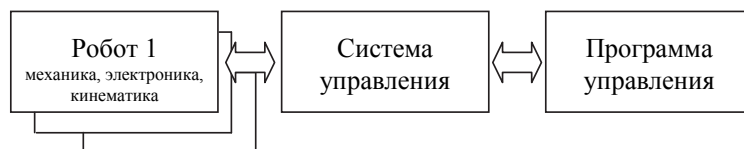


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема РТК

Развитие микропроцессоров привело к минимизации, удешевлению, доступности, универсальности систем управления роботами, а соответственно и появлению новых программ управления. Появилась необходимость в разработке программного обеспечения к системам управления нового поколения и в модернизации существующих. Современные системы управления базируются на микропроцессорной основе, универсальны, поддерживают различные языки программирования и стандарты ввода-вывода. Поэтому разработка программ управления для таких систем перешла на новый уровень, где разработчик сам выбирает программные продукты и системы разработки. Тем более что существует широкий выбор программных продуктов для разработки программ управления, они достаточно развиты, включают весь необходимый инструмент, позволяют оперативно разрабатывать необходимый программный продукт. Это визуализация, удаленный доступ, ввод-вывод через порты, работа с видеокамерой и звуком, и т. д.

Методика разработки программ управления (выбор среды разработки, структура построения, алгоритмы функционирования программ управления) мало описана и является актуальной задачей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Авторами предлагается методика разработки программы управления для РТК на базе робота-манипулятора Delta, результатом чего является более функциональная, расширяемая, универсальная программная среда управления по сравнению с существующей. Разработанная программа включает в себя локальное и удаленное управление, визуализацию с видеопотоком, ручное и командное управление (автоматическое), организацию циклов выполнения и т. д.

2. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ

Методика разработки включает в себя алгоритм (рис. 2), состоящий из следующих блоков: функции системы, структура, выбор программ и модулей разработки.

1. Функции, которые должна выполнять разрабатываемая система (локальное и удаленное управление, передача потокового видео, автоматическое управление и т. д.).

2. Разработка структуры программы, выделение основных модулей и разбивка их на отдельные блоки согласно требуемым функциям.

3. Для написания программы выбирается подходящий язык программирования, а также набор необходимых библиотек, драйверов и модулей требуемых для выполнения функций.

4. Если среда разработки полностью удовлетворяет требованиям, то можно приступить к созданию кода; если такого соответствия нет, то требуется осуществить поиск другой среды.

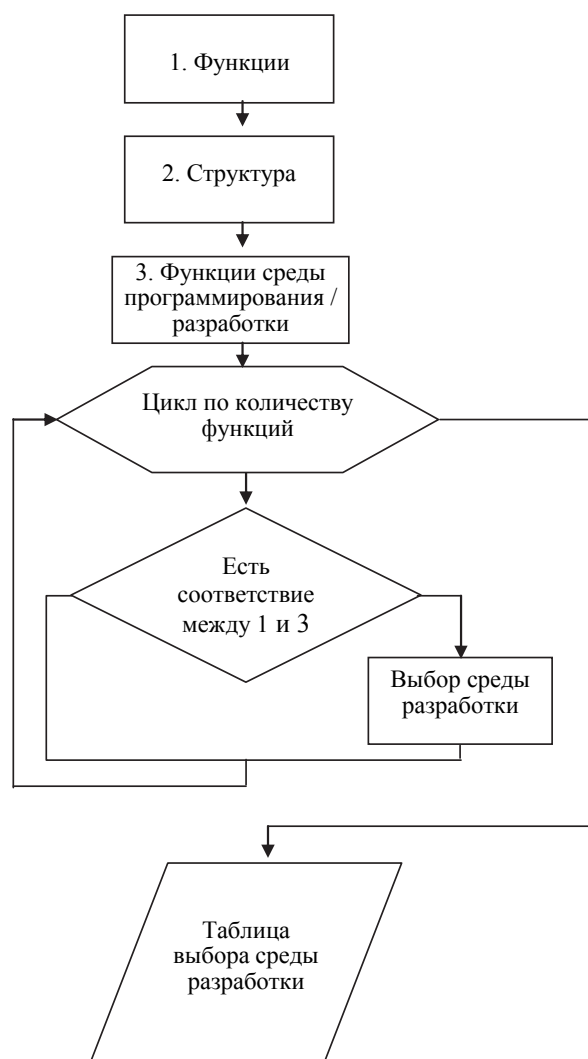


Рис. 2. Алгоритм разработки программы управления

Программа Delta v 1.0 включает в себя несколько модулей. При создании программы использовалось как можно меньше специальных библиотек и других программных компонентов, что дает большую универсальность при применении обновлений.

Программный код написан на языке Visual Basic (Visual Studio 2013). Использован NET.Framework 3.5. В разных версиях использованы разные

библиотеки System, соответственно по-разному организована работа с портами либо она отсутствует полностью, поэтому он должен быть установлен на ПК, подключенном к управляющему устройству.

Драйверы CDM от FTDI обеспечивают функциональность D2XX и VCP через единый пакет драйверов на компьютерах под управлением операционных систем Windows. Данный пакет драйверов служит для работы с устройством, подключенным по USB, как с COM-портом.

МОДУЛЬ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К УПРАВЛЯЮЩЕМУ УСТРОЙСТВУ

Управляющее устройство подключено к ПК с помощью USB-порта, а подача команд происходит через COM-порт (особенности управляющего устройства). Для корректного выполнения сопряжения используется специальный драйвер, производящий эмуляцию локального COM порта и передачу данных через него на USB. В программе для работы с COM портом подключается библиотека System.IOPorts. Ошибки подключения обрабатываются системным обработчиком ошибок.

МОДУЛЬ ВЫВОДА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Отображение состояния робота-манипулятора осуществляется с помощью USB-камеры, подключенной к этому же ПК. Для работы с графикой необходимо использовать NET.Framework 3.5. Видео организовано заполнением специального окна статичными картинками, получаемыми с камеры, с заданным интервалом, что позволяет использовать изображение с камеры и варьировать частоту кадров под задачи и разгрузить каналы передачи и ресурсы ПК. При необходимости возможно организовать подключение нескольких камер.

МОДУЛЬ ВЫВОДА

Модуль вывода тесно связан с модулем подключения и использует те же библиотеки. Вывод осуществляется отправкой сформированной команды на COM-порт. Интерпретация и обработка команд происходит в устройстве управления. Там же происходит обработка ошибок.

МОДУЛЬ ПОДГОТОВКИ И ФОРМИРОВАНИЯ КОМАНД

На подготовительном этапе каждой переменной, соответствующей звену робота, присваиваются значения в виде требуемого количества шагов двигателя с учетом передаточных чисел редуктора. Для этого производятся все необходимые расчеты, такие как пересчет значений trackbar и перевод текстовых значений из textbox в числовые значения, и т. д. Формирование команды заключается в заполнении шаблона, отформатированного под требования управляющего устройства, с подготовленными значениями.

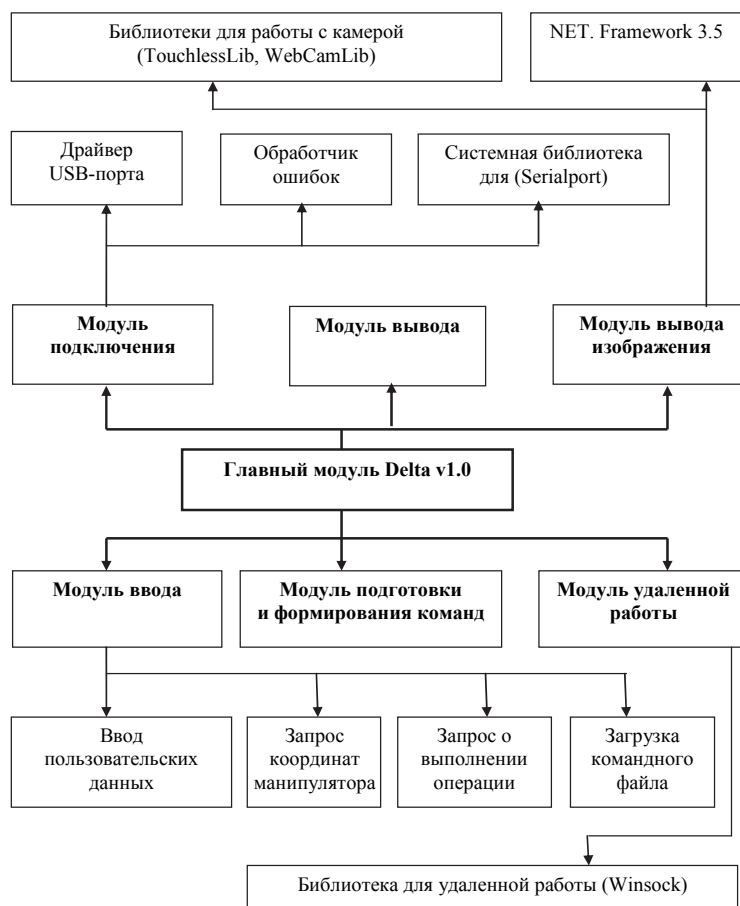


Рис. 3. Структурная схема ПО Delta v. 1.0

МОДУЛЬ ВВОДА

Поскольку используется большое количество входных данных, то и применяется несколько вариантов их получения, таких как ввод текстовой информации в специальные поля (Textbox, RichTextBox), получение информации из объекта TrackBar путем вычисления значения в зависимости от положения бегунка, заполнение многострочного текстового поля (RichTextBox) информацией из файла. Для данных операций не используется никакое специальное ПО. При получении информации с управляющего устройства робота используются те же библиотеки, что и для вывода.

МОДУЛЬ УДАЛЕННОЙ РАБОТЫ

Удаленное управление является обязательным условием для любой системы управления роботом. В данной программе реализована клиент-серверная архитектура в едином приложении. Для осуществления подключения и передачи используется библиотека Winsock. Для передачи используется два отдельных потока: TCP для управления манипулятором и UDP для передачи изображения.

3. ФОРМЫ И ФУНКЦИИ ПРОГРАМНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Программа служит для управления роботом-манипулятором Delta и поддерживает три режима: 1) ручное управление, 2) управление по координатам, 3) автоматическое управление, а также два вида работы:

1) локальное управление;

2) удаленное управление.

ПО Delta v.1.0 включает в себя четыре формы.

Главная форма программы (рис. 4) служит для выбора режима управления манипулятором.

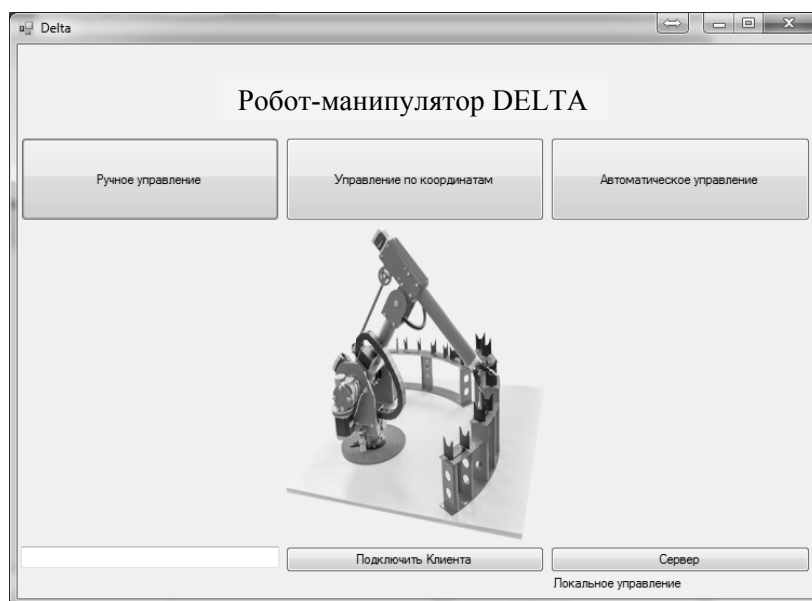


Рис. 4. Главная форма программы Delta v.1.0

Удаленное управление включает в себя два режима работы:

1) сервер (компьютер, подключенный к управляющему устройству);

2) при нажатии на кнопку «Сервер» программа переходит в режим прослушивания порта для ожидания подключения.

Клиент (удаленный компьютер)

Для подключения в режиме клиента в текстовое поле вводится адрес сервера.

При отсутствии удаленного подключения на форме отображается надпись «Локальное управление» без выделения, при удаленном – «Подключен в режиме Сервер» и «Подключен в режиме Клиент» соответственно. На других формах также будет отображаться текущее состояние.

При подключении в режиме сервера управляющие кнопки будут неактивными для исключения возможности вмешательства в процесс.

Наблюдение за движением робота происходит с помощью USB-камеры, что позволяет очень точно позиционировать схват манипулятора.

Загрузка видео с камеры состоит из двух частей.

- Установка параметров изображения

```
Public Touchless As New TouchlessLib.TouchlessMgr
Public Webka As TouchlessLib.Camera = Touchless.Cameras.Item(0)
Dim command As String
Delegate Sub SetTextCallback(ByVal [text] AsString)
Private Sub Form1_Load(sender AsSystem.Object, e AsSystem.EventArgs)
Handles MyBase.Load
If Touchless.Cameras.Count <> 0 Then
    Webka = Touchless.Cameras.Item(0)
    Touchless.CurrentCamera = Webka
    Touchless.CurrentCamera.CaptureHeight = 480
    Touchless.CurrentCamera.CaptureWidth = 640
End If
```

- Получение изображения

```
Private Sub Timer1_Tick(sender AsObject, e AsEventArgs) Handles Timer1.Tick
PictureBox1.Image = Touchless.CurrentCamera.GetCurrentImage
```

Ручное управление, алгоритм функционирования которого представлен на рис. 5, а форма – на рис. 6, осуществляется перемещением бегунков, соответствующих требуемым координатам, кнопками «Старт / Стоп» и «Сжать / Разжать» для задания состояния схвата.

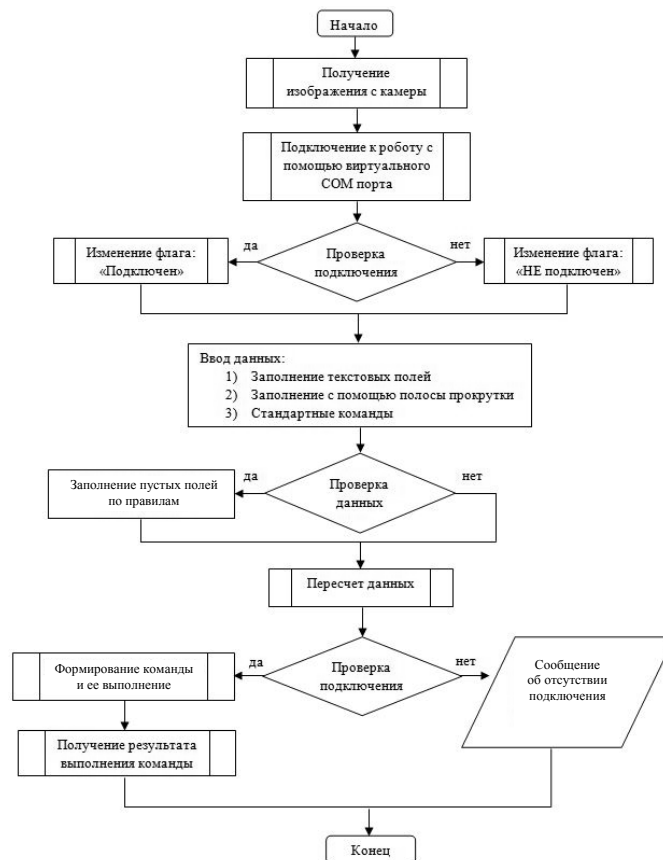


Рис. 5. Алгоритм ручного управления

Создано выпадающее меню начальных положений как по всем координатам, так и по отдельным. В специальном окне выводятся результаты выполнения действий для отслеживания состояния манипулятора.

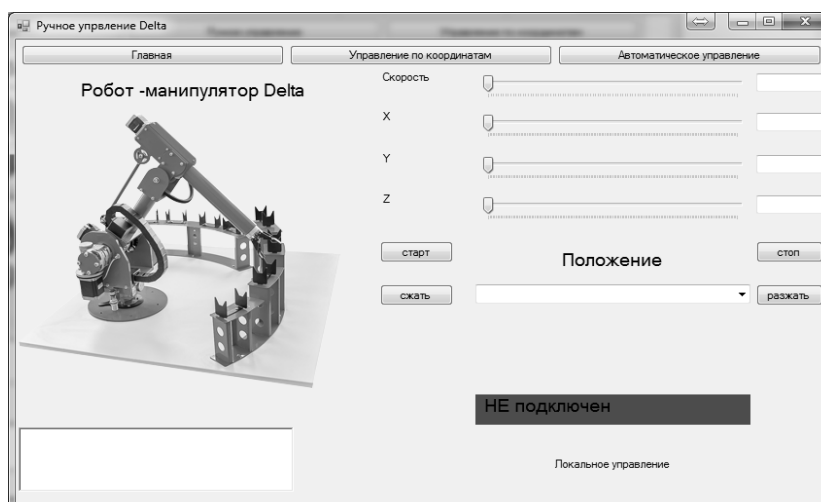


Рис. 6. Форма ручного управления программы Delta v.1.0

Режим управления манипулятором по координатам является одним из важнейших в задаче автоматизации. Он позволяет задавать перемещение не с помощью угловых координат робота, а с помощью линейных координат в декартовом пространстве, что значительно упрощает управление, так как не требуется подбирать комбинации наклона звеньев для точной установки схвата. Алгоритм перехода к линейным координатам и математическое описание приведены в статье «Аналитический и численный методы решения обратной задачи кинематики для робота Delta» [1], там же приведен пример программы.

На форме (рис. 7) после ввода координат объекта будут показаны координаты робота-манипулятора, и произойдет перемещение звена.

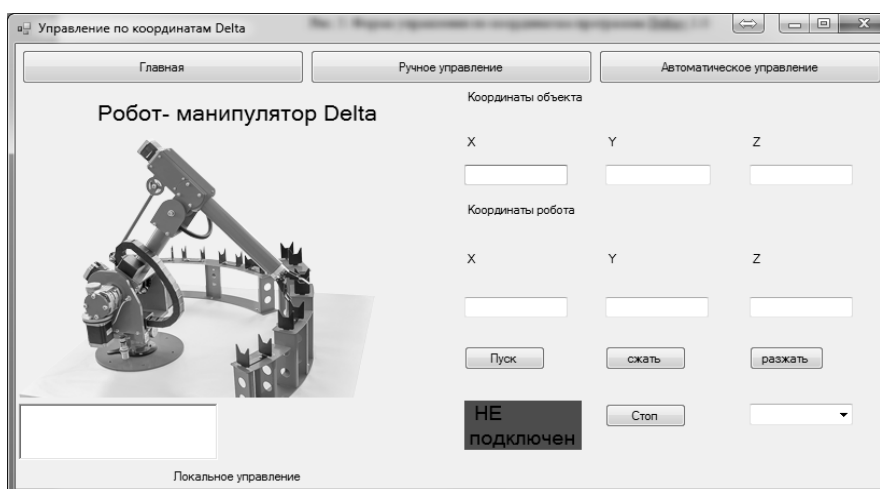


Рис. 7. Форма управления по координатам программы Delta v.1.0

Автоматическое управление, алгоритм функционирования которого представлен на рис. 8, а форма – на рис. 9, представляет собой управление по заранее написанной программе, которую можно загрузить из файла или вписать в текстовое окно.

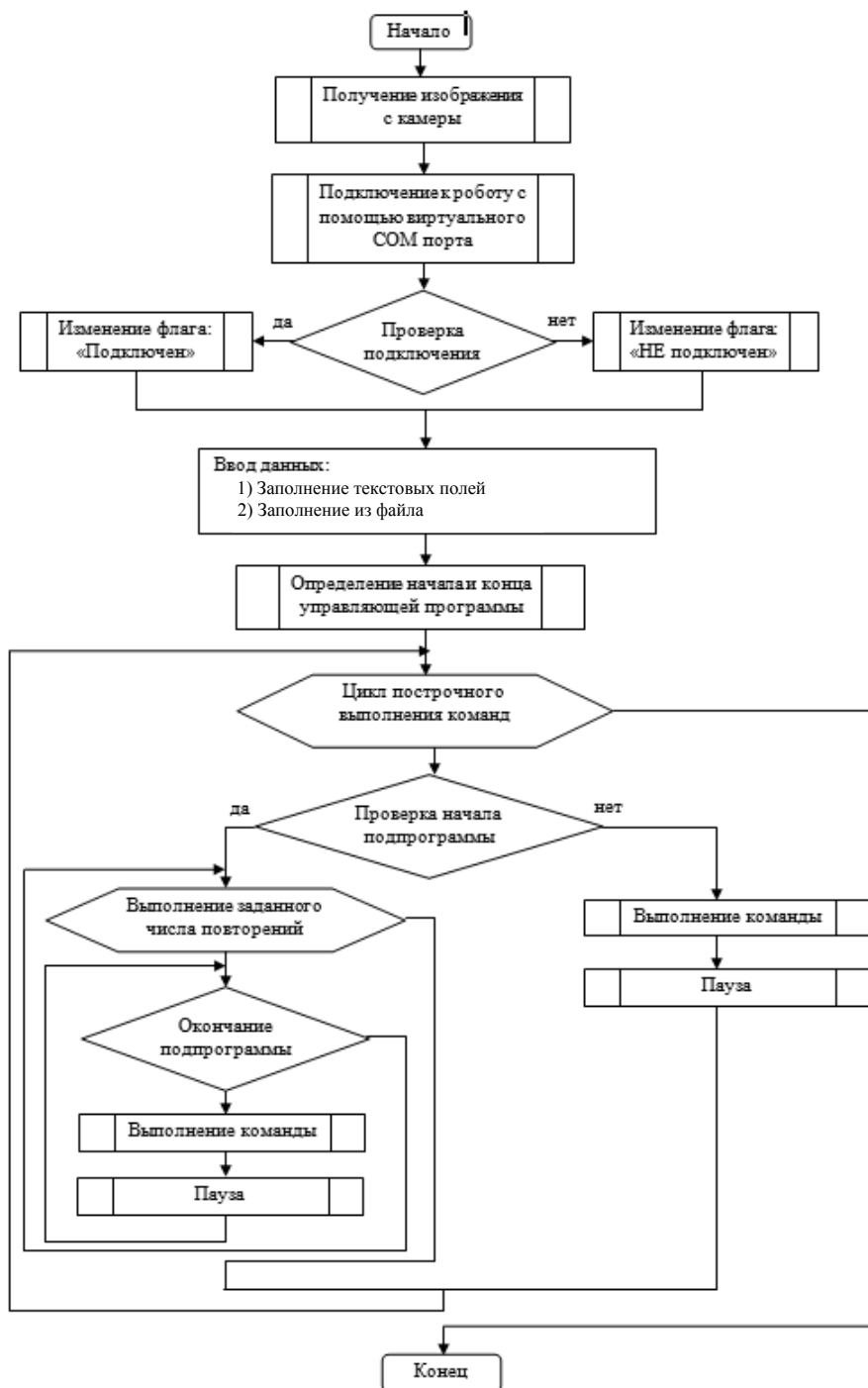


Рис. 8. Алгоритм автоматического управления

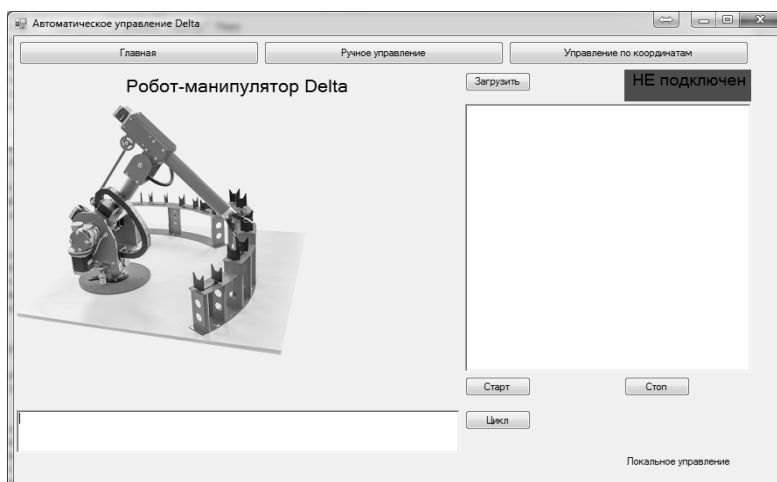


Рис. 9. Форма автоматического управления программы Delta v.1.0

Программа позволяет строить сложные задачи, включающие в себя циклы, множественные повторы и динамические переходы к различным частям управляющей программы.

Ниже приведены ключевые слова, используемые при формировании управляющей программы:

"BEGIN" – начало программы
 "FINISH" – конец программы
 "DO: " – начало подпрограммы
 "END_DO" – конец подпрограммы

Приведен пример программного кода, осуществляющий автоматическое управление:

```
Dim q As String
Dim i, b, k, r, t, m As Integer
b = RichTextBox2.GetLineFromCharIndex(RichTextBox2.Find("BEGIN"))
k = RichTextBox2.GetLineFromCharIndex(RichTextBox2.Find("FINISH"))
For i = b + 1 To k - 1
  'начало
  If (Microsoft.VisualBasic.Left(RichTextBox2.Lines(i), 3) = "DO:") Then
    r = CInt(Microsoft.VisualBasic.Right(RichTextBox2.Lines(i),
Len(RichTextBox2.Lines(i)) - 3))
    For t = 0 To r - 1
      m = 0
      Do While RichTextBox2.Lines(i + m) <> "END_DO"
        m += 1
      If RichTextBox2.Lines(i + m) <> "END_DO" Then
        q = RichTextBox2.Lines(i + m)
        SerialPort1.Write(q & vbCr)
        SleepVB(20)
      EndIf
    Loop
  Next
  i += m + 1
```


Цикловое управление требует задержки на выполнение команды (в программе задержка установлена в размере 20 с). Задержка осуществлена отдельной функцией. Для сокращения времени ожидания в функции паузы осуществляется проверка конца операции. После окончания выполнения каждой операции в специальное текстовое поле выводится текст, содержащий ответ порта (положение манипулятора и т. д.). Ключевое слово, определяющее завершение операции "READYR:", используется для окончания функции паузы:

```
Sub SleepVB(Seconds)
Dim Start As Double
    Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
    Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer <
Start + Seconds
        Application.DoEvents()
        If RichTextBox1.Text.ToLower.Contains("READYR:")
Then
            RichTextBox1.Text = ""
        Exit Do
    End If
Loop
End Sub
```

Пример кода управляющей программы:

```
«BEGIN ' начало программы
HOME ' переход в начальное положение
M10 ' схват разжать
DO:3 ' начало цикла. повторить 3 раза
G01X00000Y00000Z00500F00000
G01X00000Y00000Z00000F00000
END_DO 'Конец цикла повторов
M11 ' схват сжать
FINISH ' конец программы»
```

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программа полностью соответствует поставленной задаче. Предлагаемая методика проектирования ПО для роботов является эффективной по времени и не требует специального дополнительного ПО. Такие алгоритмы функционирования программ управления можно использовать для проектирования программного обеспечения роботов различных типов. В режиме ручного управления повышена точность задания координат, добавлен режим управления по координатам, графическая модель заменена на видео, предусмотрен контроль состояния и положения манипулятора. В режиме автоматического управления разработан новый алгоритм выполнения управляющей программы с добавлением вложенных циклов. Переход на видеоизображение открывает дополнительные возможности модернизации (реализация компьютерного зрения). Организация удаленной работы с роботом-манипулятором расширяет круг решаемых задач и повышает безопасность работы за счет отстранения от зоны движения робота. В созданном ПО воз-

можно реализовать большое количество функций: условные переходы, актуальные при подключении датчиков, полное заикливание, запись выполненных команд в файл для применения их в автоматическом режиме и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колтыгин Д.С., Седельников И.А., Петухов Н.В. Аналитический и численный методы решения обратной задачи кинематики для робота Delta // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 5 (124). – С. 87–95.
2. Колтыгин Д.С., Седельников И.А. Алгоритм определения обобщенных координат для робота Delta // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2016. – Т. 2. – С. 127–130.
3. Колтыгин Д.С., Седельников И.А. Алгоритмы и программы робототехнического комплекса // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2015. – Т. 1. – С. 93–96.
4. Колтыгин Д.С., Седельников И.А. Алгоритмы и программы робототехнического комплекса // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2014. – Т. 1. – С. 281–284.
5. Робот PASCAL DELTA 1-3X-USB+: учебное пособие. – Челябинск: ООО «Уральские станки», 2015. – 47 с.
6. Иконников А.В. Микропроцессорная система управления параллельной работой двух промышленных роботов // XXII Региональная конференция молодых ученых Волгоградской области: тезисы докладов / редкол.: А.В. Навроцкий (отв. ред.) и др. – Волгоград, 2017. – С. 80–81.
7. Zimin G.A., Mordvinov D.A. Visual dataflow language for educational robots programming // Труды Института системного программирования РАН. – 2016. – Т. 28, № 2. – С. 45–62.
8. Афонин В.Л. Интеллектуальные технологические системы. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2015.
9. Клековкин А.В. Управление учебным высокоманевренным мобильным роботом с омниколесами // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке: сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. – Ижевск, 2015. – С. 181–186.
10. Вакуленко А.С., Сартаков В.Д. Алгоритмы и программы микроконтроллерного управления промышленным роботом // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 5 (100). – С. 12–17.
11. Павловский В.Е., Павловский В.В. Математическая модель двумерной гомогенной стаи роботов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – № 4. – С. 62–71.
12. Давыдов О.И., Платонов А.К. Алгоритм управления дифференциальным приводом мобильного робота РБ-2 // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2015. – № 25. – С. 1–16.
13. Стебулянин М.М., Сеницын А.Г. Контурное управление манипуляционным роботом в режиме априорной неопределенности закона движения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 8. – С. 44–50.
14. Герасин П.В., Редько Ю.С., Мартынов В.В. Визуализация движения мехатронно-модульного робота // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 5 (56). – С. 776–778.
15. Колтыгин Д.С., Седельников И.А., Павлюк Е.Ю. Определение точности позиционирования роботов-манипуляторов DELTA и OMEGA // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2016. – Т. 2. – С. 121–126.

Колтыгин Дмитрий Станиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры управления в технических системах факультета энергетики и автоматизации Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – робототехника, программирование. Имеет более 20 публикаций. E-mail: kds@brstu.ru

Седельников Илья Андреевич, доцент кафедры управления в технических системах факультета энергетики и автоматизации Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – робототехника, программирование. Имеет более 8 публикаций. E-mail: Ohtargil@yandex.ru

The methodology for developing a robot control program for the Delta robot manipulator*

D.S. KOLTYGIN¹, I.A. SEDELNIKOV²

¹ Bratsk State University, 40, Makarenko Prospekt, Bratsk, 665709, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: kds@brstu.ru

² Bratsk State University, 40, Makarenko Prospekt, Bratsk, 665709, Russian Federation, associate professor. E-mail: ohtargil@yandex.ru

The article considers the development of software for robots - manipulators in the case of the Delta robot – manipulator. The methodology and algorithms for designing software are proposed for robots which are manipulators that do not require much time and additional specialized software. The reason for creating this software, its structure and the structure of its modules is grounded. Algorithms for manual and automatic control are presented as well as a control algorithm based on linear spatial coordinates instead of the robot angular coordinates.

The Microsoft Visual Basic (Visual Studio 2013) programming language is chosen as a basis for the development. When creating the program, as few special libraries and other software components as possible were used, which makes it more versatile when updates are used. The article contains a generalized functional diagram of a robotic complex, an algorithm for developing a control program, a block diagram of the Delta v software. 1.0., algorithms for manual and automatic control, as well as program forms for different modes of operation. As an example, fragments of the code of such functions as, image processing, cyclic processing, and automatic control are shown. As a result, a number of shortcomings of the existing program were corrected, new operating modes and new commands were created that expand the robot control capabilities. The program allows you to build complex tasks, including cycles, multiple repetitions and dynamic transitions to different parts of the control program. The basis for creating new functions and robot control programs has been obtained.

Keywords: Robot programming, robot, robotics, program, manipulator, control system, methods, algorithm

REFERENCES

1. Koltygin D.S., Sedel'nikov I.A., Petukhov N.V. Analiticheskii i chislennyi metody resheniya obratnoi zadachi kinematiki dlya robota Delta [Analytical and numerical methods for solving the inverse kinematics problem for the Delta robot]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 5 (124), pp. 87–95.
2. Koltygin D.S., Sedel'nikov I.A. Algoritm opredeleniya obobshchennykh koordinat dlya robota Delta [Algorithm for determining generalized coordinates for a Delta robot]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2016, vol. 2, pp. 127–130.
3. Koltygin D.S., Sedel'nikov I.A. Algoritmy i programmy robototekhnicheskogo kompleksa [Algorithms and programs of the robotic complex]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2015, vol. 1, pp. 93–96.
4. Koltygin D.S., Sedel'nikov I.A. Algoritmy i programmy robototekhnicheskogo kompleksa [Algorithms and programs of the robotic complex]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2014, vol. 1, pp. 281–284.
5. *Robot PASCAL DELTA 1-3X-USB+*. Chelyabinsk, Ural'skie stanki Publ., 2015. 47 p. (In Russian).
6. Ikonnikov A.V. [Microprocessor control system for parallel operation of two industrial robots]. *XXII Regional'naya konferentsiya molodykh uchenykh Volgogradskoi oblasti: tezisy dokladov*

* Received 19 September 2017.

[XXII Regional Conference of Young Scientists of the Volgograd Region Abstracts]. Ed. by A.B. Navrotsky et al. Volgograd, 2017, pp. 80–81. (In Russian).

7. Zimin G.A., Mordvinov D.A. Visual dataflow language for educational robots programming. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN – Proceedings of the Institute of System Programming of the RAS*, 2016, vol. 28, no. 2, pp. 45–62.

8. Afonin V.L. *Intellektual'nye tekhnologicheskie sistemy* [Intellectual technological systems]. Saarbrücken, LAP LAMBERT, 2015.

9. Klekovkin A.V. [Management of a highly mobile mobile robot with omnicholes training]. *Molodye uchenye – uskoreniyu nauchno-tekhnicheskogo progressa v XXI veke: sbornik materialov III Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii aspirantov, magistrantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem* [Young scientists – acceleration of scientific and technical progress in the 21st century collection of materials of the III All-Russian Scientific and Technical Conference of postgraduate students, undergraduates and young scientists with international participation]. Izhevsk, 2015, pp. 181–186. (In Russian).

10. Vakulenko A.S., Sartakov V.D. Algoritmy i programmy mikrokontrolernogo upravleniya promyshlennym robotom [Algorithms and programs of microcontroller control of industrial robot]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 5 (100), pp. 12–17.

11. Pavlovskii V.E., Pavlovskii V.V. Matematicheskaya model' dvumernoi gomogennoi stai robotov [Mathematical model of a two-dimensional homogeneous flock of robots]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii – Artificial Intelligence and Decision Making*, 2015, no. 4, pp. 62–71.

12. Davydov O.I., Platonov A.K. Algoritmy upravleniya differentsial'nym privodom mobil'nogo robota RB-2 [A control algorithm for a differential drive of RB-2 mobile robot]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha – Keldysh Institute preprints*, 2015, no. 25, pp. 1–16.

13. Stebulyanin M.M., Sinitsyn A.G. Konturnoe upravlenie manipulyatsionnym robotom v rezhime apriornoj neopredelennosti zakona dvizheniya [Contouring control of a manipulation robot in the regime of a priori uncertainty of the law of motion]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 8, pp. 44–50.

14. Gerasin P.V., Red'ko Yu.S., Martynov V.V. Vizualizatsiya dvizheniya mekhatronno-modul'nogo robota [Visualization of the motion of the mechatronic-modular robot]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Don State Technical University*, 2011, vol. 11, no. 5 (56), pp. 776–778.

15. Koltygin D.S., Sedelnikov I.A., Pavlyuk E.Yu. Opredelenie tochnosti pozitsionirovaniya robotov-manipulyatorov DELTA i OMEGA [Determining the accuracy of positioning robots robots manipulators DELTA and OMEGA]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2016, vol. 2, pp. 121–126.

Для цитирования:

Колтыгин Д.С., Седельников И.А. Методика разработки программы управления роботом для робота-манипулятора Delta // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 103–116. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-103-116.

For citation:

Koltygin D.S., Sedelnikov I.A. Metodika razrabotki programmy upravleniya robotom, dlya robota-manipulyatora Delta [The methodology for developing a robot control program for the Delta robot manipulator]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 103–116. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-103-116.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERIN
AND CONTROL

УДК 004.43

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-117-136

Функционально-императивный язык программирования E1*

А.А. МАЛЯВКО

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: a.malyavko@corp.nstu.ru

В работе обсуждается тенденция взаимопроникновения идей и технологий функциональной и императивной парадигм программирования в современные их реализации. Предлагается новый функционально-императивный язык программирования E1, во многом похожий на функциональный язык E1lang, но отличающийся от него рядом особенностей. Приводится краткое описание лексики, синтаксиса и семантики языка E1. Выделяются его основные отличительные черты и характеристики: чистые функции, функции первого и высшего порядка, анонимные функции, замыкания, перегрузка сигнатур функций, локальность сбора мусора, императивность выполнения операций в теле функции, высокоуровневые типы данных и операции над ними, вариативность статической и динамической типизации, а также иммутабельности переменных по выбору программиста, наличие примитивных и высокоуровневых типов данных и операций над ними, немногословность, простота и удобство управляющих конструкций, возможность явного определения циклов вместо более дорогостоящих рекурсивных вызовов функций, которые, впрочем, тоже можно использовать. Описывается типовая структура файла, содержащего программный модуль; приводится перечень и назначение его секций, определения функций, все виды управляющих операторов языка, сводка существенных отличительных характеристик языка. Описывается текущее состояние разработки и реализации транслятора программ с языка E1 для разных целевых платформ с использованием инфраструктуры компиляторов LLVM.

Ключевые слова: язык программирования, функциональная парадигма, императивная парадигма, лексика, синтаксис, семантика, выражение, оператор, компилятор

ВВЕДЕНИЕ

В сосуществовании императивной и функциональной парадигм программирования [1], начавшегося с момента появления двух самых первых алгоритмических языков: императивного FORTRAN и функционального LISP, сложилась ситуация противостояния [2, 3]. Эти парадигмы и реализующие их языки часто противопоставляются друг другу, и делается это обыч-

* Статья получена 20 августа 2017 г.

но с целью возвысить преимущества одной парадигмы на фоне недостатков второй [4]. В то же время наблюдается «взаимопроникновение» идей и технологий противопоставляемых парадигм как в императивные, так и в функциональные языки [5]. К таким явлениям можно относить, например, замыкания и лямбда-функции в императивных языках [6], монады и продолжения для выполнения некоторых операций строго в требуемой последовательности или различные способы создания побочных эффектов в функциональных языках [7]. Добавление все новых и новых расширенных возможностей на изначально заложенный «узкий» фундамент того или иного языка постепенно приводит к его росту до необозримости и трудностям в практическом использовании. Иногда декларируемые при этом цели «теряются» или искажаются по мере реализации средств их достижения.

В связи с этим представляет интерес создание языка, изначально обладающего достоинствами (хотя бы некоторыми) обеих парадигм и, соответственно, отсутствием хотя бы некоторых их недостатков. В этой работе описывается язык программирования E1, возникший как результат анализа известных достоинств и недостатков функционального языка Erlang [8, 9], называемого далее прототипом. При описании тех конструкций предлагаемого языка, которые существенно отличаются от конструкций прототипа, обосновываются причины и описываются ожидаемые следствия. В предлагаемом языке предпринята попытка совместить в разумной степени отличительные черты функциональной и императивной парадигмы. От функциональной парадигмы взяты чистые функции, функции первого и высшего порядка, возможность работать с иммутабельными переменными; от императивной – строго последовательное исполнение операторов тела функции, возможность организовывать циклические вычисления без использования рекурсивных вызовов функций, возможность оперировать с мутабельными (но локальными в теле функции) переменными, вариативность типизации. Некоторые лексические и синтаксические конструкции языка E1 похожи на свои аналоги в языках Java, C/C++, C# и ряда других.

1. ЛЕКСИКА ЯЗЫКА E1

Ниже приведены лексические единицы (слова) языка.

1. Идентификаторы: последовательности букв, цифр или символа подчеркивания «_», начинающиеся с буквы (неважно, прописной или строчной) или с подчеркивания. В отличие от Erlang, идентификаторы могут начинаться и со строчных букв, а символ «_» никакой специальной роли не играет.

2. Ключевые слова: выделенные идентификаторы, играющие особую роль в тексте программы, например *when*, *by*, *of*, *int* и ряд других. Ключевые слова не могут использоваться, например, для именованья переменных или функций.

3. Числа: вещественные в обычной или научной форме, целые десятичные и целые в заданной системе счисления вида *<основание> \$ <значение>*. Эта форма представления численных литералов унаследована из прототипа, только вместо символа «#» используется символ «\$».

4. Атомы: непустые последовательности произвольных UNICODE-символов, обязательно заключенные в одинарные апострофы. Внешний вид ато-

мов несколько отличается от Erlang, в котором атомы – это просто последовательности букв, начинающиеся со строчной буквы, или другие последовательности, заключаемые в одиночные апострофы. Некоторые атомы, например *'true'*, *'false'*, *'number'*, *'string'* и ряд других, играют специальные роли в программах на языке El, для двух атомов даже введены ключевые слова – аналоги. Это логические значения *true* и *false*.

5. Строки: последовательности произвольных UNICODE-символов, заключенные в двойные апострофы, например: "string", "это\u0020строка\u0020символов" или "это тоже строка символов: !'№;%:?'*(".

6. Отдельные символы и последовательности символов, используемые в качестве знаков операций, скобок, разделителей и ограничителей. Некоторые допустимые слова этой группы демонстрируются далее при описании синтаксических конструкций языка.

Между словами в тексте программы могут располагаться однострочные или блочные комментарии. Однострочный комментарий начинается с двух символов «//», может содержать произвольные символы и заканчивается переводом строки. Блочный комментарий начинается с двух символов «/*», заканчивается символами «*/», может содержать произвольные символы, в том числе переводы строки, строчные комментарии и, в отличие от многих других языков, – вложенные блочные комментарии.

Синтаксическими единицами языка являются выражения, операторы, блоки операторов и функции.

2. СТРУКТУРА ПРОГРАММ НА ЯЗЫКЕ EL

Компилируемой единицей является модуль, текст которого должен целиком содержаться в одном файле (имена модуля и файла не обязательно должны совпадать). Модуль в определенном смысле представляет собой класс, хотя и может использоваться без явного создания экземпляра. Явное создание экземпляра модуля тоже возможно, при этом явно и неявно созданные экземпляры могут (но не обязаны) различаться состояниями (значениями неизменяемых переменных, которые доступны по чтению во всех функциях модуля, но невидимы извне).

В файле текста программы на языке El составляющие части (разделы) модуля должны следовать друг за другом строго в указанном порядке:

<имя модуля>@<опции>@<импорт>@<инициализаторы>@<функции>

Здесь и далее символ @ в качестве верхнего индекса обозначает необязательно присутствующий раздел. Раздел *<опции>* в этой работе не рассматривается, он предназначен для передачи компилятору параметров трансляции и сборки.

Именованное и импортное модулей необходимо для организации межмодульных связей при компиляции и сборке программы. Соответствующие предложения в тексте могут выглядеть, например, так:

```
module neuroNet;
import neurons, neurons.synapses;
import neurons.training;
```

«Вложенности подмодулей» в модули, которую можно «увидеть» в приведенных предложениях импорта, на самом деле не существует. Другими

словами, модули *neurons* и *neurons.synapses* во всех смыслах равноправны, второй не является частью первого. Имена модулей с использованием точки могут использоваться исключительно для удобства разбиения большого количества функций и программных единиц на разумно организованные совокупности. Объявления импорта модулей нужны компилятору и сборщику в случае, если из функций данного модуля вызываются функции, входящие в другие модули. В то же время существует возможность вызова функций из другого модуля без его импортирования, она описана далее.

Между произвольными двумя строками текста модуля могут находиться макроопределения, записываемые каждое в отдельной строке (или в нескольких последовательных строках). Механизм макросов очень похож на свой аналог в C/C++, но имеется несколько отличий. Во-первых, для создания макроопределения используется ключевое слово *macro* (не начинающееся с символа «#» как *#define*), которое должно находиться в самом начале строки (первые 5 символов). Во-вторых, в списке аргументов макроопределения допустимы табуляции и пробелы. В третьих, при попытке использования рекурсивных макровыводов первый вложенный макрос не заменяется макрорасширением. Это может, но не обязательно повлечь выдачу синтаксических или семантических ошибок в период компиляции для предложения, в котором содержится макровывод рекурсивно определенного макроса. Сообщений об ошибках или предупреждений, связанных с каким-либо некорректным использованием механизма макросов, компилятор не выдает.

В любой точке текста модуля в качестве отдельной строки может появиться: *include <путь_и_имя_файла> //слово include без #, как и macro*

Текст указанного файла вставляется вместо этой строки, после чего обрабатывается как часть транслируемого модуля. Включаемый файл может включать другие файлы, глубина вложенности ничем не ограничена, но попытка рекурсивного включения тоже блокируется с выдачей предупреждения. При обнаружении каких-либо ошибок во включенном тексте компилятор формирует диагностическое сообщение, содержащее указанные в предложениях *include* имена всех включенных файлов (вплоть до точки возникновения ошибки) и номера строк. Отсутствие включаемого файла по указанному пути не рассматривается как ошибка, но компилятор выдает предупреждение.

Раздел *<инициализаторы>* по назначению очень похож на объектные инициализаторы в языке Java. Он содержит анонимные функции (см. ниже), исполняемые при создании экземпляра модуля. Нужная анонимная функция выбирается сопоставлением списков формальных и фактических аргументов (фактические аргументы указываются при создании экземпляра модуля путем вызова встроенной функции *new*). Иммутабельные переменные, получающие значения в инициализаторах, видимы во всех функциях модуля и могут рассматриваться как константные поля модуля.

3. СИНТАКСИС И СЕМАНТИКА ЯЗЫКА

Синтаксическими единицами языка являются функции, блоки операторов, выражения и операторы.

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ МОДУЛЯ

Основным в тексте модуля является раздел *<функции>*, в котором могут быть определены одна или несколько функций. Функции объявляются так:

<модификатор доступа>@ <заголовок> <тело функции>

В качестве модификатора доступа используется одно из ключевых слов – *public* или *private*. Функции, объявленные как *public*, могут быть вызваны из любого другого модуля, а как *private* – только из данного модуля. Отсутствие модификатора трактуется как объявление со словом *private*.

Заголовок функции представляет собой идентификатор, за которым в круглых скобках следует возможно пустой кортеж формальных аргументов – последовательность выражений языка через запятую. Модуль может содержать любое количество определений функций с одним и тем же идентификатором и даже с одним и тем же набором формальных аргументов. В процессе исполнения программы при вызове функции с этим идентификатором выполняется последовательное сопоставление кортежа фактических аргументов с образцами – кортежами формальных аргументов разных определений функции. Сопоставление осуществляется в порядке следования объявлений функции с этим именем в файле. Это позволяет иметь в модуле несколько версий функции с одним и тем же образцом формальных аргументов, размещая нужную версию перед другими – полезная возможность, облегчающая получение метрик или отладку программы. В этом язык E1 отличается и от прототипа, и от большинства других языков, в которых обычно не допускается перегрузка функций с одинаковыми сигнатурами. При первом положительном результате сопоставления выполняется непосредственно следующее за этим заголовком тело функции, которое в общем случае представляет собой цепочку блоков условного выполнения.

Каждый такой блок выглядит следующим образом:

<охранник> { <объявления переменных>@ <последовательность операторов> }

Охранник (охранное выражение) имеет вид:

when <выражение> :

Для того чтобы охраняемый блок был выполнен, необходимо, чтобы выражение в охраннике имело значение *'true'* (или просто *true*). Любые другие значения считаются эквивалентными значению *'false'* (*false*).

Выполнение выбранного по подходящим аргументам тела функции состоит в последовательном (в текстуальном порядке) вычислении значений охранных выражений до тех пор, пока одно из них не окажется истинным. Тогда выполняется непосредственно следующая за охранником последовательность операторов, заключенная в фигурные скобки (блок), выполнение функции на этом завершается, а в вызывающую функцию возвращается значение, выработанное последним выполненным оператором блока.

Охранник последнего блока в цепочке может быть пустым, это эквивалентно охранному выражению *when true* :. Если такого блока нет и охранники всех блоков тела выбранной по аргументам функции ложны, то в вызывающую функцию возвращается значение *nothing*.

Вот простейший пример функции с несколькими охраняемыми блоками:

```
threeLevel(?(n) == 'number') //Выражение ?(n) возвращает тип переменной n
  when n < 0 : { -1; }      //Охранник этого блока: when n < 0 :
                          //Этот блок возвращает значение выражения -1.
  when n == 0 : { 0; }     //Этот блок возвращает значение 0.
  { 1; }                  //Это неохранный блок, возвращающий значение 1.
```

Если функция *threeLevel* вызывается с единственным аргументом, тип которого – целое или вещественное число (только в этом случае сопоставление аргумента с образцом *?(n) == 'number'* будет успешным), то начнется выполнение тела, содержащего два охраняемых и один неохранный блок. Нужный блок будет выбран путем вычисления значений охранников, сравнивающих фактический аргумент с нулем. В результате будет возвращено одно из трех значений -1, 0 или 1. Заметим, что в модуле могут существовать другие определения функции *threeLevel*: без аргументов с двумя или более аргументами или с одним аргументом, но не числовым. При вызове любой из них сопоставление фактических аргументов с образцом *?(n) == 'number'* не будет успешным.

Точно такого же результата можно было бы добиться и путем написания единственного неохранный блока в качестве тела этой функции, выполнив внутри блока проверку значения полученного аргумента. Однако использование охранных выражений позволяет писать более короткие тела функций.

3.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ В ФУНКЦИЯХ

Функции в языке E1 оперируют только с локальными переменными (фактические аргументы тоже локальны, потому что передаются исключительно по значению) и именованными константными полями экземпляра модуля. Таким образом, функции (за исключением некоторых встроенных, осуществляющих, например, ввод-вывод информации) в принципе не могут порождать побочного эффекта. В момент выхода из функции, сопровождаемого возвратом некоторого значения (которое далее используется как локальное в вызывающей функции), все ее локальные переменные становятся ненужными и занятая ими память освобождается. В этом и состоит сбор мусора в программах на языке E1. Глобальных переменных в языке E1 нет вообще, поэтому нет необходимости в других видах сбора мусора.

Первое появление имени переменной начинает (открывает) область ее видимости, заканчивающуюся в конце блока и, возможно, прерывающуюся во вложенных блоках, содержащих явное объявление с этим же именем.

Необъявленные переменные блока по умолчанию являются неизменяемыми (иммутабельными). Этого же эффекта можно добиться, явно объявляя переменную в секции *<объявления переменных>* блока с использованием ключевого слова *def*, например, так:

```
def myVariable;
```

При необходимости с помощью ключевого слова *var* для какой-либо переменной можно указать, что в блоке допускается переписывание ее значения. Это выглядит так:

```
var eventClass;
```

Локальные переменные функции, имеющие любой, явно или неявно объявляемый тип, как изменяемые так и иммутабельные, могут быть объявлены с ключевым словом *static*. Значения таких переменных будут сохраняться в промежутке времени между разными вызовами данной функции. Такие переменные локальны, т. е. недоступны для использования в любых других функциях.

3.3. ТИПИЗАЦИЯ В ЯЗЫКЕ EL

В языке El существуют данные следующих типов: числа, атомы, строки, векторы (массивы однотипных элементов), списки, кортежи, бинарники, функции, модули. Тип значения переменной может быть не задан явно. Тогда при первом присваивании она получает и значение, и его тип. Иммутабельные переменные после этого не могут получить ни другое значение, ни другой тип. Мутабельные переменные, определенные без указания типа, могут получать и другое значение, и другой тип.

Явно можно задавать типы *int*, *long*, *bigint*, *float*, *double*, *bigfloat*, *string*, *atom*, *list*, *tuple*, *binary*, *function*, *module*; способы записи объявления переменной с указанием ее типа:

```
var long eventCount;  
def tuple vendorData, customerData;
```

Тип данных вектор задается не ключевым словом *vector*, а специальной нотацией, определяемой при рассмотрении данных этого типа.

Явно заданные переменные численных типов *int*, *long*, *float*, *double* называются примитивными, все остальные – объектными.

Если тип переменной задан явно, то присваиваемое ей значение должно иметь точно такой же тип (или неявно преобразуемый к нему, например *int* -> *long* или *int* -> *double*), иначе выбрасывается исключение времени выполнения. Исключения можно перехватывать и обрабатывать с использованием оператора *try-catch-finally*. В то же время для предотвращения возникновения таких исключений присваиваемые значения можно явно приводить к нужному типу. Для этого нужно использовать постфиксный знак операции «!*<имя_типа>*'», например:

```
eventCount += anyValue!'int';
```

Значение переменной *anyValue*, каким бы ни был его тип, перед прибавлением его к *eventCount* преобразуется в целое. Явные преобразования, так же как в C-подобных языках, могут сопровождаться потерей данных или точности. Неявные преобразования возможны, но только в пределах типа *number*, к которому принадлежат все его численные подтипы *int*, *long*,

Явное задание типа элементов массивов (векторов) преследует цель уменьшение объемов памяти на их хранение и затрат времени на обработку. В том случае, если в выражениях, значения которых используются для формирования значений элементов вектора, используются только неявно преобразуемые друг в друга типы, компилятор может построить соответствующие фрагменты целевой программы без проверок возможности возникновения исключений (естественно, кроме непроверяемых во время компиляции, например деление на ноль).

Явно можно также задавать, что переменная имеет тип записи (полный аналог конструкции *record* в языке Erlang и близкий к понятию *struct* в C/C++). Объявления записей (это один из инициализаторов модуля) могут появляться в начале файла до объявления первой функции. Пусть запись объявлена так:

```
record authorData(firstName, lastName, birthDay = (day, month, year), authorId);
```

Тогда переменная, с использованием которой обрабатываются данные об авторах книг, может быть объявлена так:

```
var authorData author; //или так:  
def authorData author; //если ее не нужно переприсваивать
```

Теперь внутри блока к значениям полей записи *author* можно обращаться по имени как к полям объектной переменной:

```
author.firstName (или author.birthDay.year).
```

Тип значения любого выражения (в частности, переменной или константы) во время исполнения программы можно получить с использованием знака операции «*?(expression)*». Эта операция возвращает один из атомов '*number*', '*atom*', '*string*', '*vector*', '*list*', '*tuple*', '*binary*', '*function*', '*module*', '*nothing*'. Например, использование этого знака операции для вышеопределенной переменной типа *authorDate* в виде *?(author)* вернет атом '*tuple*'. Тип значения '*nothing*' соответствует отсутствию значения, т. е. несвязанной переменной в терминах функционального программирования. В языке Erlang этому соответствует понятие *unbound*.

3.4. ТИПЫ ДАННЫХ

В описании типов данных будем использовать понятия выражения и оператора присваивания, в том числе присваивания с вычислениями.

1. Числа относятся к обобщенному типу *number* и могут быть целыми (одного из трех подтипов *int*, *long*, *bigint*) или вещественными (трех подтипов *float*, *double*, *bigfloat*). Подтипы различаются диапазонами (и для вещественных – точностью) представления значений. Подтип *int* соответствует 32-битному представлению целых чисел, *long* – 64-битному, *bigint* – представлению, занимающему столько памяти, сколько необходимо для данного числа. Аналогично, подтип *float* предполагает 32-битное представление (согласно стандарту IEEE 754), *double* – 64-битное и *bigfloat* – представление с требуемой точностью. Все числа хранятся и обрабатываются со знаком. Если подтип не определен явно, то для целых чисел используется формат *bigint*, а для вещественных – *bigfloat*. Обработка чисел в форматах *bigint* и *bigfloat* требует значительно больших расходов как по памяти, так и по времени, поэтому во всех тех случаях, когда диапазон значений при написании программы может быть оценен как ограниченный сверху, имеет смысл явно определять подходящий подтип для численных переменных. Формат численных литералов (констант) определяется компилятором.

2. Атомы – неизменяемые элементы данных, представляющие любые последовательности символов, заключенные в одинарные апострофы. К атомам применимы только операции сравнения и простого присваивания их переменным. В выражениях присваивания атом может находиться только спра-

ва от знака операции «=». Например, верно: *month* = 'сентябрь', неверно: *month* += 'сентябрь' или 'сентябрь' = 'октябрь'. Операции сравнения (применяемые как к атомам, например 'сентябрь' > 'октябрь', так и к значениям других типов) вырабатывают атомарные значения 'true' или 'false'. Выражение 'сентябрь' > 'октябрь' имеет значение 'true', поскольку атомы сравниваются лексикографически. Для удобства можно считать, что в любом месте доступны две имутабельные переменные: *true* со значением 'true' и *false* со значением 'false'.

3. Тип данных 'string' (строка) отличается от типа «атом», во-первых, способом записи литералов; во-вторых, тем, что над строками кроме операций сравнения и присваивания определена еще операция сцепления (конкатенации), обозначаемая символом «+», и, в третьих, тем, что любая строка является одновременно вектором, содержащим символы – элементы целочисленного подтипа *int*. В силу этого к строкам применимы все операции и встроенные методы, которые могут выполняться над векторами, рассматриваемыми ниже. Строковые литералы – это последовательности любых символов Юникода, заключаемые в двойные кавычки, например "this is string", правила их оформления заимствованы из языка Java.

4. Данные типа 'vector' представляют собой массивы однотипных элементов. Многомерные массивы могут быть как ступенчатыми, так и прямоугольными. Ступенчатый вектор можно рассматривать как массив векторов на единицу меньшей размерности. Размерность вектора фиксируется в момент его создания и не может быть изменена. Имутабельность всех элементов вектора определяется тем, описан он с использованием ключевого слова *var* или нет. Векторы объявляются путем указания количества размерностей и, возможно, количества элементов по размерностям следующим образом.

Объявления ступенчатых векторов:

```
var@ min@ [<размер>@][<размер>@]...идентификатор<, идентификатор ...>;
```

Объявления прямоугольных векторов:

```
var@ min@ [<размер>@, <размер>@, ]...идентификатор<, идентификатор ...>;
```

Примеры объявлений векторов:

```
var int[10, 11] matrix; //целочисленный изменяемый прямоугольный массив
//размерами 10*11 элементов
def authorData[] authors; //одномерный массив неизменяемых записей,
//его размерность будет определена при создании с помощью функции new
var float[numSensors] sumIndication, currIndication; //два вектора, видимо
//предназначенные для хранения показаний датчиков
def [sizeX][sizeY][sizeZ] volume; //трехмерный ступенчатый массив
//неизменяемых элементов, тип которых будет
//фиксирован при первой записи значения в любой элемент
```

Создание векторов выполняется неявно, если все размерности и размеры по ним заданы в объявлении (так создаются все массивы из примеров, кроме *authors*). Если же размеры по размерностям явно не заданы, то вектор может быть создан явно путем вызова встроенной функции *new*, например:

```
authors = new( authorData[123] ); //создается //одномерный массив из 123 записей
```

К вектору в целом могут применяться все знаки операций, если они применимы к его элементам и при условии совпадения размерностей и раз-

меров в том случае, если операция применяется к двум массивам. Например, оператор:

```
matrix -= I;
```

вычитет единицу из каждого элемента объявленного выше массива (это значит, что не нужно писать два вложенных цикла, перебирающих строки и столбцы вектора).

В языке E1 для облегчения программирования операций с массивами предусмотрены еще и следующие возможности:

- использование обозначений нижней « $_$ » и верхней « \wedge » границ индексов внутри индексных выражений (например, *autors*[\wedge] определяет обращение к последнему элементу вектора *autors*, а *matrix*[$_$][\wedge] обозначает последний элемент самой первой строки двумерного массива *matrix*);

- получение нижней «*lo()*» и верхней «*hi()*» границ изменения индексов вектора, а также количества элементов в нем «*size()*» для какой-либо обработки (например, оператор *autorsCount* = *autors.size()*, который занесет количество записей в массиве *autors* в переменную *autorsCount*);

- задание диапазонов изменения индексов обрабатываемых элементов с помощью обозначения « \dots », используемого между начальной и конечной границами (включительно). Границы могут задаваться произвольными целочисленными выражениями. Например, оператор сложения двух векторов можно записать так:

```
sumIndication[ $\_$ .. $\wedge$ ] += currIndication[ $\_$ .. $\wedge$ ];
```

В индексном выражении может быть указан шаг перебора. Например, так: [$\wedge-1$.. $_+1$ step 2]. Здесь указано, что индексы обрабатываемых элементов должны изменяться с шагом 2 начиная с предпоследнего ($\wedge-1$) и до второго ($_+1$). Направление перебора элементов определяется компилятором по соотношению заданных нижней и верхней границы. Если нижняя граница меньше верхней, то при переборе индекс увеличивается на значение шага, иначе – уменьшается.

- использование ссылок вида « $\#\#$ » (« $\#\#\#$ », « $\#\#\#\#$ », ...) на ранее заданные в текущем операторе индексные выражения. Количество символов $\#$ в ссылке означает порядковый номер индексного выражения в операторе. Тот же оператор сложения векторов с использованием ссылок можно переписать так:

```
sumIndication[ $\_$ .. $\wedge$ ] += currIndication[ $\#\#$ ];
```

Более сложный пример использования индексных ссылок – запись на языке E1 так называемого прямого хода метода Гаусса решения системы линейных алгебраических уравнений. Пусть *matrix* – двумерный изменяемый вектор коэффициентов и свободных членов решаемой системы размерностью *N* строк на (*N*+1) столбцов. Тогда приведение этого вектора к нижнему треугольному виду (ниже главной диагонали – все нули) можно задать одним оператором:

```
matrix[ $\_+1$  ..  $\wedge$ ] -= matrix[ $\_$  ..  $\#-1$ ] * matrix[ $\#\#$ ][ $\#\#$ ] / matrix[ $\#\#\#$ ][ $\#\#\#$ ];
```

В этом операторе определено следующее:

- перечисляются все строки, кроме первой (имеющей индекс *matrix*[$_$]);
- для вычисления нового значения каждой строки используются все предыдущие строки, поскольку индексное выражение *matrix*[$_$.. $\#-1$] в правой части оператора присваивания не совпадает с выражением в левой части,

но тоже определяет перебор и ссылается на самый первый индекс оператора как на верхнюю границу;

- перебор предыдущих строк выполняется в порядке возрастания их индексов от начального до индекса перевычисляемой строки без единицы ($_.. \#-1$);

- каждая перебираемая строка вычитается поэлементно из данной перевычисляемой строки;

- перед этим каждый элемент вычитаемой строки умножается на элемент, находящийся в перевычисляемой строке в столбце с номером перебираемой строки ($matrix[\#][\#\#]$), и делится на элемент главной диагонали вычитаемой строки ($matrix[\#\#][\#\#]$).

Аналог этого оператора на С-подобном языке значительно более многословен.

5. Тип данных «список» (*'list'*). Список – это одномерный массив изменяемого в процессе выполнения программы размера, содержащий не обязательно однородные значения. Список может содержать одновременно несколько элементов любых типов, в том числе списки, векторы, кортежи, функции и т. д. Это типичные свойства списков для функциональных языков. Список можно сконструировать явно, например, так:

```
anyList = [1, 'text', ("first", "second", []), 12.345, [a, b, c], (n){n+1; /*it's function*/};
```

Здесь первый элемент – это целый литерал, второй – атом, третий – кортеж, содержащий две строки и пустой список (о кортежах – в следующем пункте описания типов данных), далее – вещественный литерал, затем – список из трех переменных, и последний элемент – анонимная функция от одного аргумента. Это так называемый нерегулярный, редко используемый вид списка. Ниже будут обсуждаться в основном регулярные списки, содержащие наборы однотипных значений, поскольку именно такие списки легко формируются с помощью эффективных средств генерации. При работе со списком можно извлечь несколько элементов (например, три первых) и записать их значения в обычные переменные (пусть это будут несвязанные переменные x и y), поместив остаток (в виде списка) в третью несвязанную переменную z :

```
(x, 'text', y, z) = anyList;
```

Поскольку переменные x , y и z несвязанные, сопоставление завершается успешно (вторыми элементами и кортежа, и списка является атом *'text'*). Поэтому переменная x получает значение 1, переменная y – значение (*"first", "second", []*) типа кортеж и переменная z – хвост исходного списка, т. е. $[12.345, \dots]$.

В языке E1 списки обладают дополнительной функциональностью: они двусвязные, допускают доступ как с головы, так и с хвоста и имеют соответствующие средства генерации (*list comprehension*). Обычное разбиение списка на голову (первый элемент) и остаток выглядит так: $[head <| tail]$. Разбиение на начало и хвост (последний элемент) – так: $[head |> tail]$. Одновременный доступ к голове, средней части (телу) и хвосту – так: $[head <| body |> tail]$. Обозначения головы и хвоста могут содержать по несколько элементов, перечисляемых через запятую, как в предыдущем примере. Если голову или хвост не предполагается извлекать, то соответствующий знак операции (<| или <|) опускается.

Для реальной эффективной работы со списками необходимо владеть средствами их генерации. В языке E1 генерация списков возможна как путем

серии добавления элементов в конец списка (образования нового хвоста на каждом шаге, знак операции «<?»), так и путем добавления элементов в начало (образования новой головы, знак операции «?>»). Синтаксис этих способов генерации:

```
[<новая_голова> <? <источник, способ и условия формирования>]
[<источник, способ и условия формирования> ?> <новый_хвост>]
```

Полный синтаксис и семантика средств генерации списков позволяют формировать произвольные структуры данных в качестве элементов генерируемого списка и использовать функции, в том числе анонимные, в качестве источников и произвольные логические выражения в качестве условий формирования. Функции в генераторах списков дают возможность организовывать ленивые вычисления, как и в Erlang.

Над списками в целом можно выполнять операции слияния (знак операции «+») и удаления всех элементов, входящих во второй список, из первого (знак операции «-»).

6. Тип данных кортеж ('*tuple*') представляет собой совокупность как правило разнородных элементов данных. Кортежи-литералы записываются в программе в виде последовательности элементов, заключенных в круглые скобки (в отличие от Erlang, использующего фигурные скобки). Примеры кортежей-литералов приводились ранее при рассмотрении списков. Кортежи в некотором смысле аналогичны структурам в C/C++ с тем отличием, что их элементы не имеют имен. Однако использование записей и соответствующих объявлений переменных позволяет обращаться к элементам кортежей по именам. Для кортежей существует ряд методов, позволяющих узнавать количество элементов, извлекать и заменять (при условии, что переменная, хранящая кортеж, мутабельна) элементы данных по номеру.

7. Тип данных «бинарник» ('*binary*') практически полностью позаимствован из языка Erlang, некоторые отличия можно будет найти в документации по языку.

8. Функции ('*function*') представляют собой особый тип данных, с которым можно выполнять только создание, присваивание переменной, передачу в качестве аргумента в другую функцию, возврат из другой функции и, наконец, вызов/выполнение. Любая функция, определенная в модуле (и как *public*, и как *private*), может быть присвоена как значение переменной в любой другой функции этого же модуля. Кроме того, существует возможность создавать и использовать анонимные функции. Вот довольно условный пример, в котором анонимная функция возвращается в качестве результата:

```
sampleFunctionReturnsAnonimFunction (?(arg) == 'number') {
(x) when?(x) == 'number': {x * arg; } {0; }; //это выражение – анонимная
// функция, тело которой содержит два блока, один – охраняемый
}
```

И теперь пример ее использования:

```
anyFunction = sampleFunctionReturnsAnonimFunction (3);
x = anyFunction(5); //x получит значение 15
```

9. Тип данных '*module*' предназначен для хранения экземпляра модуля, создаваемого с помощью встроенной функции *new*. Переменная такого типа может использоваться для вызова функций именно этого экземпляра модуля.

3.5. ОПЕРАТОРЫ ЯЗЫКА

Секция *<последовательность операторов>* любого блока содержит именно последовательность выполняемых операторов. Перечислим и охарактеризуем операторы языка.

1. Пустой оператор. Для его обозначения используется точка с запятой «;», обычно завершающая другие операторы, если их запись согласно синтаксическим правилам не заканчивается фигурной закрывающей скобкой. Пустой оператор ничего не делает и не изменяет последнего вычисленного значения.

2. Выражение. Выражения в языке E1 конструируются обычным образом с использованием термов, круглых скобок и знаков операций. Завершается выражение-оператор точкой с запятой. Термами могут быть атомы, литералы численные, литералы строковые, индексные ссылки и границы, имена переменных (в том числе формальных аргументов и именованных констант модуля), вызовы функций (возможно, определенных в других модулях), элементы векторов, списков, кортежей, бинарников, анонимные функции. При выполнении оператора «выражение» вычисляется, если это возможно, его значение и запоминается в качестве последнего для возврата из функции. В силу того, что отнюдь не все знаки операций применимы к любому виду термов, вычисление значения выражения может вызывать исключение времени выполнения. Для перехвата и обработки исключений следует использовать оператор *«try – catch – finally»*, описываемый ниже. Знаками операций являются:

– присваивания «=», «+=», «-=», «*=», «/=», «\=» (разделить нацело и присвоить), «%=» (вычислить остаток по модулю и присвоить), «|=», «\$=», «\$|=», «\$&=», «\$^=», «\$<=», «\$>=», «\$~=» (знаки операций, начинающиеся с символа «\$», оперируют с битами);

– логические «|» и «&», «~»;

– битовые «\$|», «\$&», «\$^», «\$~», «\$<», «\$>»;

– сравнения «==», «<>», «===» (идентично, т. е. совпадают и типы, и значения), «<=>» (не идентично), «>», «>=», «<», «<=»;

– арифметические «+», «-», «*», «/», «\», «%»;

– операции инкремента «++» и декремента «--»;

– доступ к элементам или встроенным методам списков, кортежей, векторов, бинарников и модулей «.» или «\$».

Приоритеты знаков операций в основном возрастают по мере этого перечисления, однако все унарные операции (логическое отрицание «~», битовая инверсия «\$~», унарные «+» и «-») имеют приоритет выше, чем все бинарные, но ниже приоритета операций инкремента и декремента. Операции присваивания правоассоциативны, а все остальные, для которых это понятие имеет смысл, – левоассоциативны.

3. Оператор присваивания / сопоставления с образцом. Выражение присваивания, завершающееся точкой с запятой, является оператором присваивания. В зависимости от того, могут ли переприсваиваться значения элементов выражения, находящегося слева от знака операции, и сочетания типов выражений, связанных этим знаком, перед собственно присвоением значения может выполняться сопоставление с образцом. Если в левой части есть имутабельные элементы, уже получившие какое-либо значение, то соответ-

ствующие им элементы должны иметь точно такой же тип и точно такое же значение, в противном случае выбрасывается исключение. Если в левой части есть элементы, тип которых объявлен явно, то соответствующие им значения из правой части должны иметь точно такой же или неявно приводимый к нему тип, иначе выбрасывается исключение. После успешного выполнения всех проверок новые значения записываются в элементы левой части выражения.

4. Оператор атомарной перестановки значений переменных. Операция перестановки значений, обозначаемая последовательностью литер «:=», выделяется среди всех остальных операций. Она введена в расчете на возможное параллельное исполнение тела функции, применима только к двум выражениям и выполняется атомарно, т. е. не может быть прервана после того, как начала исполняться. Ее выполнение можно описать как три присваивания, выполняющиеся последовательно и неразрывно друг за другом с блокировкой доступа к используемым выражениям из других активаций функции, созданием временной переменной и соблюдением всех правил сопоставления с образцом:

– временной переменной присваивается значение (и тип) левого выражения;

– левому выражению присваивается значение правого выражения;

– правому выражению присваивается значение временной переменной.

5. Оператор возврата значения из функции. Записывается так:

return <выражение>@;

Обеспечивает возможность управления выходом из функции с возвратом значения указанного выражения. При отсутствии выражения возвращает «*nothing*» – начальное значение любой переменной до первого присваивания.

6. Оператор ветвления вычислений. Имеются две разные формы этого оператора.

Форма 1:

```
by <.:метка>@ <выражение> {
  of <выражение> : <последовательность_операторов> // ветка оператора by
  of ...           // другие ветки
  else :           // ветка else, обязательно
} // закрывающая скобка оператора by
```

При выполнении этого оператора вначале вычисляется значение выражения, указанного после ключевого слова *by*. Затем оно последовательно сопоставляется с образцами, следующими после ключевых слов *of*, обозначающих начала веток оператора, до тех пор, пока в какой-либо из них сопоставление с образцом не окажется успешным. В этом случае выполняется следующая за двоеточием после этого выражения <последовательность_операторов> (вплоть до ключевого слова *of* другой ветки, ключевого слова *else* при его использовании или до фигурной скобки, закрывающей этот оператор). Если при выполнении этой последовательности не встретится один из операторов *again*, *break* или *next*, то выполняется выход из оператора *by*, т. е. начинает выполняться оператор, следующий за закрывающей фигурной скобкой. С помощью операторов *again*, *break* и *next* можно изменять это поведение. Ветка *else* должна быть последней в операторе и выполняется только в том случае, если ни одна из предшествующих веток не выполнялась.

Оператор *again* обеспечивает возврат на начало выполнения оператора *by* (т. е. на вычисление выражения, указанного после слова *by*). Такой оператор имеет смысл применять в тех случаях, когда значение этого выражения или выражений в предшествующих ветках после слов *of* могло измениться в результате выполнения *<последовательности_операторов>*.

– *again* *<метка>* – возврат на начало управляющего оператора, помеченного указанной меткой. Таким оператором может быть текущий оператор *by* или охватывающий его оператор более высокого уровня. При отсутствии в тексте помеченного охватывающего оператора компилятор выдает синтаксическую ошибку.

– *break* – немедленный выход из данного управляющего оператора.

– *break* *<метка>* – выход из этого или охватывающего оператора, помеченного меткой.

– *next* – переход к выполнению *<последовательности_операторов>* следующего по тексту ключевого слова *of* без проверки его образца.

Любые операторы, следующие после слов *again*, *break* и *next* вплоть до следующего слова *of* или до фигурной закрывающей скобки, закрывающей оператор *by* (что встретится раньше), игнорируются с выдачей предупреждения.

Форма 2:

```
by <::метка>@ <выражение>@ {
  when <выражение> : <последовательность_операторов> //первая ветка
  when ... // другие ветки, необязательно
  else : <последовательность_операторов> // ветка else, необязательно
}
```

Вычисляется *<выражение>*, следующее за словом *by*, если таковое присутствует. Возвращаемое значение не запоминается и не используется для возврата из функции, в этом выражении могут быть присвоены нужные начальные значения каким-либо переменным, используемым в теле управляющего оператора. Затем вычисляется значение выражения, следующего за первым ключевым словом *when*. Если вычисленное значение не совпадает с логическим значением *true* (атом *'true'*), то выполняется переход к следующей ветке *when*, и так далее, вплоть до ветки *else* или закрывающей скобки. Если выражение в какой-либо ветке имеет значение *true*, то выполняется следующая за двоеточием *<последовательность_операторов>* этой ветки (вплоть до следующего слова *when*, слова *else*, или до закрывающей фигурной скобки), после чего (при отсутствии операторов *again*, *break* и *next*) осуществляется выход из тела оператора *by*. Последовательность операторов ветки *else* выполняется только в том случае, если ни одно из выражений веток *when* не оказалось истинным. Как и в форме 1, *<последовательность_операторов>* может завершаться одним из операторов *again*, *again* *<метка>*, *break*, *break* *<метка>*, *next*. Во второй форме выполнение *again* (*again* *<метка>*) приводит к переходу на вычисление выражения первой ветки *when* в соответствующем управляющем операторе, *<выражение>* после его ключевого слова *by* заново не вычисляется.

Управляющий оператор *by* позволяет конструировать аналоги условных операторов, операторов цикла и переключателей императивных языков программирования. Например, операторы

by x <= y { of true : z = x; of false : z = y; } //форма 1

by { when x <= y : z = x; else z = y; } //форма 2

строго эквивалентны условному оператору языка C/C++:

if (x <= y) z = x; else z = y;

Оператор

by i = 0; sum = 0; { when i < 10 : sum += array[i]; i += 1; again; }

выполняет ту же работу, что и цикл языка C/C++:

for(i = 0, sum = 0; i < 10; i++) sum += array[i];

Значением условного оператора в целом является значение, выработанное последним оператором, выполненным в какой-либо ветке (операторы *again*, *break* и *next* значений не вырабатывают) к моменту выхода из оператора *by*. Если не была выполнена ни одна ветка оператора *by*, то значение, хранящееся для возврата из функции, не изменяется.

7. Блок операторов (*block*). Это один оператор или последовательность операторов, заключенные в фигурные скобки и, возможно, предваряемые объявлениями переменных. Блок рассматривается как одиночный оператор языка и может использоваться везде, где может быть записан одиночный оператор. Использование блоков предоставляет возможность ограничения видимости переменных. Переменные, объявленные внутри блока, не видны вне его. Объявление переменной внутри блока скрывает переменные с таким же именем, объявленные / используемые в любом из охватывающих блоков.

8. Оператор перехвата и обработки исключений времени выполнения.

Синтаксис:

try block

catch {

of <выражение> : <последовательность_операторов>

of ...

}

finally block

Этот оператор содержит три части: *try*, *catch* и *finally*. Его семантика практически полностью совпадает с семантикой оператора перехвата исключений в Java, отличия можно найти в руководстве по языку.

4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯЗЫКА EL

Представленный в работе язык программирования El сочетает признаки функциональной и императивной парадигм, развивает некоторые привлекательные черты языка-прототипа Erlang [8] и других функциональных языков и не имеет меньшего количества недостатков. Среди достоинств языка можно отметить отсутствие сборщика мусора и в то же время – явного захвата и освобождения памяти. Конечно, платой за это являются некоторые затраты времени на захват памяти для переменных в момент входа в блок и на ее возврат при выходе из блока, но эти затраты распределены по всему времени выполнения функций программы и не будут вызывать эффекта «stop the world» [10].

Ожидаемая простота тестирования и отладки, обусловленная тем, что нет глобальных переменных и указателей, нет побочного эффекта у функций (за исключением некоторых встроенных и ряда функций стандартных модулей, осуществляющих ввод-вывод), все функции чистые. Любое значение любой переменной устанавливается только внутри данной функции. Если функция отлажена, то на ее работоспособность ничто извне повлиять не может. За это, конечно, тоже есть плата – необходимость копирования значений при передаче их в функции и возврате.

Доступны функции высшего порядка, анонимные функции, замыкания, т. е. общеизвестные достоинства функциональной парадигмы.

Реализован полиморфизм на уровне сигнатур, а не имен функций.

Реализована возможность создавать и использовать объекты, но нет ни интерфейсов, ни наследования. Борьба с дублирующимися кодами может вестись другими способами, в частности, разумной организацией совокупности модулей.

Возможность явного задания циклических вычислений вместо более дорогостоящих рекурсивных вызовов, которые тоже можно использовать.

Немногословность и простота управляющих конструкций, возможность описывать в едином стиле условные вычисления, циклические вычисления и многоветочные разветвления.

Возможность использовать статическую типизацию, в частности, с целью организации эффективной обработки данных примитивных типов.

Возможности использования встроенных высокоуровневых типов данных (списки, кортежи, бинарники, векторы, функции) и наличие высокоуровневых операций над ними, в том числе операции над векторами в целом, упрощающие их распараллеливание компилятором.

На языке E1 возможно программирование и в чисто функциональном стиле (иммутабельные переменные, рекурсия вместо циклов, использование функций высшего порядка...), и в чисто императивном стиле (все переменные мутабельны, организация циклических вычислений без рекурсии и т. д.), и, наконец, в смешанном, императивно-функциональном стиле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На кафедре вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета в настоящее время ведется разработка компилятора с предложенного в данной работе функционально-императивного языка программирования E1 для различных платформ – Linux и Windows. Лексический и синтаксический анализаторы компилятора были разработаны с использованием пакета программ автоматизации разработки трансляторов Вебтранслаб [11], также созданного автором и используемого в учебном процессе [12]. С целью обеспечения возможности генерации объектного кода для различных целевых платформ в качестве исполняющей системы объектного кода выбрана инфраструктура компиляторов Low Level Virtual Machine (LLVM) [13]. В соответствии с технологией использования LLVM, подробно описанной в работах [14, 15], разработаны все необходимые структуры данных и реализована часть функций построителя псевдокода и генератора объектного кода для некоторых типов данных и исполняемых конструкций языка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Себеста Р. Основные концепции языков программирования. – М.: Вильямс, 2001.
2. Кауфман В.Ш. Языки программирования. Концепции и принципы. – М.: ДМК-Пресс, 2011. – 464 с.
3. Филд А., Харрисон П. Функциональное программирование. – М.: Мир, 1993. – 637 с.
4. Wadler P. Why no one uses functional languages // ACM SIGPLAN Notices. – 1998. – Vol. 33 (8). – P. 23–27.
5. Городняя Л.В. Парадигмальная декомпозиция определения языка программирования // Научный сервис в сети Интернет: труды XVIII Всероссийской научной конференции, (19–24 сентября 2016 г., г. Новороссийск). – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. – С. 115–127.
6. Davis A. What's new in Java 8: an unofficial guide [Electronic resource]. – May 7, 2014. – URL: <https://leanpub.com/whatsnewinjava8/read> (accessed: 21.03.2018).
7. Ахмечет В. Функциональное программирование для всех [Электронный ресурс] // RSDN Magazine. – 2006. – N 2. – URL: <http://rsdn.org/article/funcprog/fp.xml> (дата обращения: 21.03.2018).
8. Armstrong J. Programming Erlang: software for a concurrent world. – 2nd ed. – Dallas, Texas: The Pragmatic Bookshelf, 2013.
9. Чезарини Ф., Томпсон С. Программирование в Erlang. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 487 с.
10. Десять решений проблемы stop the world при использовании автоматической сборки мусора [Электронный ресурс]. – URL: <https://eax.me/stop-the-world/> (дата обращения: 21.03.2018).
11. Малявко А.А. Формальные языки и компиляторы: учебное пособие для вузов. – М.: Юрайт, 2017. – 429 с.
12. Малявко А.А. Использование веб-приложений и веб-технологий при разработке учебного программного обеспечения для изучения методов трансляции // Современное образование: технические университеты в модернизации экономики России: материалы Международной научно-методической конференции. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2011. – С. 45–47.
13. Лонес Б, Аулер Р. LLVM: инфраструктура для разработки компиляторов. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 342 с.
14. Сен А. Создание действующего компилятора с помощью инфраструктуры LLVM. Ч. 1 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/os-createcompilerllvm1/index.html> (дата обращения: 21.03.2018).
15. Сен А. Создание действующего компилятора с помощью инфраструктуры LLVM. Ч. 2 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/os-createcompilerllvm2/index.html> (дата обращения: 21.03.2018).

Малявко Александр Антонович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники факультета автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: языки программирования и теория трансляции, нейронные сети, параллельные вычисления. Имеет более 40 публикаций. E-mail: a.malyavko@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-117-136

The El functional-imperative programming language*

A.A. MALYAVKO

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: a.malyavko@corp.nstu.ru

The paper discusses the tendency of interpenetration of ideas and technologies of functional and imperative paradigms of programming in their modern implementation. A new functional-imperative programming language El is proposed, which in many respects resembles the

* *Received 20 August 2017.*

functional Erlang language, but differs from it in some features. A brief introduction to the El lexis, syntax and semantics is given. Its main distinguishing features and characteristics are described such as pure functions, first and higher order functions, anonymous functions, closures, function signature overload, garbage collection at the moment of return from the function, imperative principle of operation execution in the body of the function, high-level data types and operations with them, variability of static and dynamic typing as well as the immutability of variables by the choice of the programmer, the availability of primitive and object types of data, brevity, simplicity and convenience of control structures, a possibility of an explicit cycle programming instead of more expensive recursive function calls, which, however, can also be used. A typical structure of a file containing a program module is described; a list and purpose of its sections, definitions of functions, and all kinds of control language operators are given. A summary of significant distinctive characteristics of the language is presented. The current state of the development and implementation of the program translator from the El language for different target platforms using the LLVM compiler infrastructure is described.

Keywords: Programming language, functional paradigm, imperative paradigm, lexis, syntax, semantics, expression, operator, compiler

REFERENCES

1. Sebesta R. *Concepts of programming languages*. Boston, Addison Wesley, 2001 (Russ. ed.: Sebesta P. *Osnovnye kontseptsii yazykov programmirovaniya*. Moscow, Vil'yams Publ., 2001).
2. Kaufman V.Sh. *Yazyki programmirovaniya. Kontseptsii i printsipy* [Programming languages. Concepts and principles]. Moscow, DMK-Press Publ., 2011. 464 p.
3. Field A., Harrison P. *Functional programming*. Wokingham, England, Addison-Wesley, 1988 (Russ. ed.: Fild A., Kharrison P. *Funktsional'noe programmirovanie*. Moscow, Mir Publ., 1993. 637 p.).
4. Wadler P. Why no one uses functional languages. *ACM SIGPLAN Notices*, 1998, vol. 33 (8), pp. 23–27.
5. Gorodnyaya L.V. [Paradigmatic decomposition of the definition of a programming language]. *Nauchnyi servis v seti Internet: trudy XVIII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii* [Scientific service in network Internet: proceedings of the XVIII International scientific conference], Novorossiisk, September 19–24, 2016, pp. 115–127. (In Russian).
6. Davis A. *What's new in Java 8: an unofficial guide*. May 7, 2014. Available at: <https://leanpub.com/whatsnewinjava8/read/> (accessed 21.03.2018).
7. Akhmechet V. *Functional programming for the rest of us*. (In Russian). Available at: <http://www.defmacro.org/2006/06/19/fp.html> (accessed 21.03.2018).
8. Armstrong J. *Programming Erlang: software for a concurrent world*. 2nd ed. Dallas, Texas, The Pragmatic Bookshelf, 2013.
9. Cesarini F., Thompson S. *Erlang programming*. Beijing; Cambridge, MA, O'Reilly Media, 2009 (Russ. ed.: Chezarini F., Tompson S. *Programmirovanie v Erlang*. Moscow, DMK Press Publ., 2012. 487 p.).
10. *Desyat' reshenii problemy stop the world pri ispol'zovanii avtomaticheskoi sborki musora* [Ten solutions to the problem of stop the world when using automatic garbage collection]. Available at: <https://eax.me/stop-the-world/> (accessed 21.03.2018).
11. Maliavko A.A. *Formal'nye yazyki i kompilyatory* [Formal languages and compilers]. Moscow, Yurait Publ., 2017. 429 p.
12. Maliavko A.A. [Using web applications and web technologies in the development of educational software for studying methods of translation]. *Sovremennoe obrazovanie: tekhnicheskie universitety v modernizatsii ekonomiki Rossii: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii* [Modern education: technical universities in the modernization of the economy Russia: materials International scientific-methodical conference]. Tomsk, TUSUR Publ., 2011, pp. 45–47. (In Russian).
13. Lopes B, Auler R. *Getting started with LLVM core libraries*. Birmingham, Packt Publishing, 2014 (Russ. ed.: Lopes B, Auler R. *LLVM: infrastruktura dlya razrabotki kompilyatorov*. Moscow, DMK Press Publ., 2015. 342 p.).

14. Sen A. *Create a working compiler with the LLVM framework, pt. 1.* (In Russian). Available at: <https://www.ibm.com/developerworks/library/os-createcompilerllvm1>. (accessed 21.03.2018).

15. Sen A. *Create a working compiler with the LLVM framework, pt. 2.* (In Russian). Available at: <https://www.ibm.com/developerworks/library/os-createcompilerllvm2> (accessed 21.03.2018).

Для цитирования:

Малявко А.А. Функционально-императивный язык программирования EI // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 117–136. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-117-136.

For citation:

Maliavko A.A. Funktsional'no-imperativnyi yazyk programmirovaniya EI [The EI functional-imperative programming language]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 117–136. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-117-136.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.5.013

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-137-152

Многоконтурное адаптивное управление мультикоптерами*

М.Ю. МЕДВЕДЕВ¹, А.Е. КУЛЬЧЕНКО², В.А. ШЕВЧЕНКО³, В.С. ЛАЗАРЕВ⁴

¹ 347928, РФ, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, Южный федеральный университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: medvmihal@sfedu.ru

² 347928, РФ, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, Южный федеральный университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: kulchenko.a.e.work@gmail.com

³ 347928, РФ, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, Южный федеральный университет, младший научный сотрудник. E-mail: droogg@mail.ru

⁴ 347928, РФ, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, Южный федеральный университет, аспирант. E-mail: vlazarev@sfedu.ru

В статье дан краткий обзор методов бесперебойного адаптивного управления, в том числе с эталонными моделями. В общем виде приведена математическая модель мультикоптера. Приведен синтез эталонной модели мультикоптера. Модель объекта и эталонная модель имеют аналогичную структуру, при этом параметры эталонной модели известны. Синтез управления номинальной моделью позволяет корректно сформировать матрицы коэффициентов уравнений траекторной ошибки и ошибки по скорости движения и оценить разницу между мультикоптером и его эталонной моделью, основываясь на разнице между номинальным управлением и реальными значениями сил и моментов, подаваемых на подвижный объект. В работе рассматриваются системы управления с алгоритмами адаптивного управления с эталонными моделями, обеспечением астатизма и оцениванием возмущений. Для адаптации к параметрическим возмущениям модели и внешним возмущениям (например, ветровым) используются контур обеспечения астатизма, асимптотический наблюдатель возмущений и контур параметрической адаптации. Введены дополнительные интеграторы, чтобы обеспечить в замкнутой системе управления подвижного объекта астатизм. Приводятся результаты численного моделирования полета мультикоптера по траектории с использованием различных контуров адаптации по отдельности и совместно. В связи с тем, что на мультикоптер действуют постоянные ветровые возмущения, вектор внешних возмущений представлен в виде периодической функции. Рассмотрены случаи с наиболее заметными отклонениями траектории полета для разных способов адаптации. В моделировании параметрические отклонения связаны с неточностью определения зависимостей между тягами винтомоторных групп и управляемых переменных, а также с действием неучтенных в модели присоединенных масс.

Ключевые слова: мультикоптер, подвижный объект, позиционно-траекторное управление, астатизм, наблюдатель, адаптивное управление, адаптация, оценивание возмущений

* Статья получена 14 февраля 2018 г.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 16-08-00013 «Разработка метода двухконтурной адаптации систем позиционно-траекторного управления с использованием робастных наблюдателей возмущений и эталонных моделей», выполняемого Южным федеральным университетом.

ВВЕДЕНИЕ

Метод адаптивного управления с эталонными моделями [1–3] является одним из наиболее эффективных методов беспоиcкового адаптивного управления. Об этом можно судить по результатам применения данного метода [4, 5]. Актуальность, а также пути развития метода адаптивного управления с эталонными моделями подробно освещены в работах [6–13].

Описанные в работах [6, 7, 12] эталонные модели в системах адаптивного управления являются нелинейными. В [6, 12] нелинейная эталонная модель строится для нестационарного объекта с нелинейным исполнительным механизмом, а в [7] эталонная модель содержит нелинейные блоки, которые обеспечивают нахождение фазовых переменных в линейной области.

В работах [8, 11] рассмотрен синтез алгоритма адаптации линейного одноканального объекта на основе критерия гиперустойчивости. Объект описывается уравнением вход-выход с коэффициентами, заданными в виде интервалов. В [8] предлагается алгоритм управления в условиях постоянного внешнего возмущения, основанный только на измерении выхода объекта. При этом известны лишь максимально возможные значения числителя и знаменателя передаточной функции. В [11] для решения задачи управления в условиях ограничения входного сигнала предлагается использовать две эталонные модели, обеспечивающие оценку неизмеряемых переменных состояния и ограниченность ошибки системы управления.

Беспоиcковые адаптивные алгоритмы могут успешно применяться для управления высотой вертолета [9], а также для управления газотурбинной установкой [10]. В [9] предложены алгоритмы адаптивного управления с идентификатором и эталонной моделью. В [10] применяется структура с двумя контурами адаптации – параметрической и сигнальной настройками.

Применение алгоритмов адаптивного управления для подвижных объектов описано в работах [13–16]. В [14–16] подвижный объект описывается моделью твердого тела с нелинейными уравнениями движения, а также задача его позиционирования. Адаптивная часть включает в себя явную эталонную модель, контур обеспечения астатизма, контур настройки коэффициентов адаптации и робастный алгоритм оценки векторного возмущения.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИКОПТЕРА

Математическая модель мультикоптера представлена в виде

$$\dot{y} = R(y)x; \quad (1)$$

$$\dot{x} = M^{-1}(F_u + F_d(y, x, t)), \quad (2)$$

где y – (1×6) – вектор линейных и угловых координат в неподвижной системе координат; x – (1×6) – вектор линейных и угловых скоростей в связанной с подвижным объектом системе координат; $R(y)$ – матрица кинематики; F_u – вектор управляющих сил и моментов; $F_d(y, x, t)$ – вектор прочих сил и моментов; M – матрица инерционных параметров.

Для приведенной модели применены следующие допущения.

1. Элементы матрицы M являются постоянными параметрами:

$$M(i, j) \in [M_{ij}^{\min} \quad M_{ij}^{\max}], \quad (3)$$

где M_{ij}^{\min} , M_{ij}^{\max} , $i, j = \overline{1, 6}$ – константы.

2. Вектор $F_u = F_u(u, k_\delta)$ является функцией вектора управляющих воздействий u и вектора интервальных параметров $k_\delta \in [k_{\delta \min}^i \quad k_{\delta \max}^i]$, где

$k_{\delta \min}^i, k_{\delta \max}^i$ – постоянные числа. Вектор u имеет размерность m .

3. Вектор прочих сил и моментов $F_d(y, x, t)$ является неизвестным и представляется в виде

$$F_d(y, x, t) = F_{d1}(y, x) + F_{d2}(t); \quad (4)$$

$$\|F_{d1}(y, x)\| \leq A_{Fy} \|y\| + A_{Fx} \|x\|; \quad (5)$$

$$|F_{d2}^i(t)| \leq F_{d2}^{i0}, \quad |\dot{F}_{d2}^i(t)| \leq \dot{F}_{d2}^{i0}, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (6)$$

где $A_{Fx}, A_{Fy}, F_{d2}^{i0}, \dot{F}_{d2}^{i0}$ – постоянные числа; $\|\cdot\|$ – операция вычисления нормы; $|\cdot|$ – операция вычисления модуля.

Траекторная ошибка задается в виде

$$\psi_{tr} = A_1 Y u + A_2 y + A_3. \quad (7)$$

Ошибка по скорости движения задается в виде

$$\psi_{ck} = A_4 x + A_5. \quad (8)$$

Размерность вектора ψ_{tr} равна μ , а размерность вектора ψ_{ck} равна ν .

Матрицы A_1, A_2 имеют размерность $\mu \times 6$, вектор A_3 – размерность μ , матрица A_4 – размерность $\nu \times 6$, а вектор A_5 – размерность ν .

Диагональная матрица Y имеет вид

$$Y = \text{diag}([y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4 \quad y_5 \quad y_6]).$$

Запись квадратичной формы в виде (7) обусловлена тем, что матрицы A_1, A_2 не являются в общем случае квадратными.

2. СИНТЕЗ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИКОПТЕРА

Номинальная модель мультикоптера имеет аналогичную структуру (1) и (2). В отличие от модели объекта (1) и (2), номинальная модель известна.

1. Элементы матрицы M_m являются постоянными известными параметрами.

2. Вектор $F_{um} = F_{um}(u_m, k_{\delta m})$ является функцией вектора управляющих воздействий u и вектора постоянных известных параметров $k_{\delta m}$.

3. Вектор прочих сил и моментов $F_{dm}(y_m, x_m, t)$ является известным.

Векторы ошибок номинальной модели подвижного объекта сформируем в соответствии с (7) и (8) в виде

$$\Psi_{trm} = A_1 Y_m y_m + A_2 y_m + A_3; \quad (9)$$

$$\Psi_{ckm} = A_4 x_m + A_5, \quad (10)$$

где

$$Y_m = \text{diag}([y_{1m} \ y_{2m} \ y_{3m} \ y_{4m} \ y_{5m} \ y_{6m}]).$$

Потребуем, чтобы векторы удовлетворяли следующим эталонным уравнениям

$$\ddot{\Psi}_{trm} + T_2 \dot{\Psi}_{trm} + T_1 \Psi_{trm} = 0; \quad (11)$$

$$\dot{\Psi}_{ckm} + T_3 \Psi_{ckm} = 0, \quad (12)$$

где T_1 , T_2 и T_3 – диагональные положительно определенные матрицы постоянных коэффициентов.

Первая и вторая производные по времени от вектора Ψ_{trm} (9) вычислены в силу уравнений эталонной модели

$$\dot{\Psi}_{trm} = A_1 R_m x_m + A_2 M_m; \quad (13)$$

$$\ddot{\Psi}_{trm} = A_1 R_m x_m + A_1 R_m \dot{x}_m + A_2 M_m^{-1} \left(\frac{\partial F_{dm}}{\partial x_m} \dot{x}_m + \frac{\partial F_{dm}}{\partial y_m} \dot{y}_m \right), \quad (14)$$

где $\dot{R}(y_m)$ – производная матрицы $R(y_m)$, вычисляемая в соответствии с определением [16]:

$$\dot{Y}_m = \text{diag}([\dot{y}_{1m} \ \dot{y}_{2m} \ \dot{y}_{3m} \ \dot{y}_{4m} \ \dot{y}_{5m} \ \dot{y}_{6m}]),$$

$$\dot{y}_{im} = R_i(y_m) x_m, \quad i = \overline{1,6},$$

$R_i(y_m)$ – i -я строка матрицы $R(y_m)$.

Производная по времени от вектора Ψ_{ckm} (10) равна

$$\dot{\Psi}_{ckm} = A_4 \dot{x}_m. \quad (15)$$

Подставив выражения (14) и (15) в уравнения (11) и (12), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} A_1 \dot{R}_m x_m + A_2 M_m^{-1} \frac{\partial F_{dm}}{\partial y_m} R_m x_m = -T_2 \dot{\Psi}_{trm} - T_1 \Psi_{trm}, \\ A_4 \dot{x}_m = -T_3 \Psi_{ckm}. \end{cases} \quad (16)$$

Решая систему (16) относительно вектора \dot{x}_{im} , получаем

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} A_1 R_m + A_2 M_m^{-1} \frac{\partial F_{dm}}{\partial x_m} \\ A_4 \end{bmatrix} \dot{x}_m = \\ & = - \begin{bmatrix} A_1 \dot{R}_m x_m + A_2 M_m^{-1} \frac{\partial F_{dm}}{\partial y_m} R_m x_m + T_2 \dot{\Psi}_{trm} - T_1 \Psi_{trm} \\ T_3 \Psi_{ckm} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для нахождения вектора управляющих воздействий представим вектор управляющих сил и моментов в виде

$$F_{um} = K_{\delta m} u_m, \quad (18)$$

где $K_{\delta m}$ – матрица размерности $6 \times (\mu + \nu)$.

Если нет возможности представить вектор управляющих сил и моментов в виде (18), то можно воспользоваться двухэтапным подходом, представленным в работах [14, 17]. В соответствии с этим подходом на первом этапе путем введения промежуточных переменных решается задача нахождения управлений для линейной по управлению системы. На втором этапе осуществляется нахождение реальных управлений путем решения нелинейной алгебраической системы уравнений. Такой подход успешно применен в системе управления роботизированной воздухоплавательной платформы [17]. Также примем число каналов управления $m = \mu + \nu$. В работах [14, 17] рассмотрен случай, когда $m \neq \mu + \nu$.

Из выражения (19) с учетом (10) и (20) находим

$$\begin{aligned} u_m & = \left(\begin{bmatrix} A_2 R_m \\ A_4 \end{bmatrix} M_m^{-1} K_{\delta m} \right)^{-1} \times \\ & \times \left(\begin{bmatrix} A_2 R_m \\ A_4 \end{bmatrix} M_m^{-1} F_{dm} + \begin{bmatrix} A_2 \dot{R}_m x_m + T_2 \dot{\Psi}_{trm} + T_1 \Psi_{trm} \\ T_3 \Psi_{ckm} \end{bmatrix} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

В традиционных системах адаптивного управления с эталонной моделью схема задается в виде уравнений (11) и (12). Синтез управления номинальной моделью позволяет корректно сформировать матрицы T_1 и T_2 уравнений (11) и (12), а также оценить разницу между номинальной моделью и подвижным объектом, основываясь на разнице между номинальным управлением (19) и реальными значениями сил и моментов, подаваемых на подвижный объект.

3. СИНТЕЗ БАЗОВОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ

Ошибки управления для подвижного объекта формируются в виде выражений (7) и (8).

Система управления подвижного объекта строится как следящая система, ошибкой которой является разница между переменными (9), (10) и (7), (8).

Для повышения точности следящей системы алгоритм управления строится таким образом, чтобы обеспечить астатизм. Чтобы обеспечить в замкнутой системе управления подвижного объекта астатизм, вводятся дополнительные интеграторы

$$\dot{z}_1 = z_2, \dot{z}_2 = z_3, \dots, \dot{z}_{n_{tr}} = \Psi_{tr} - \Psi_{trm} = A_1 Y y + A_2 y - A_1 Y_m y_m - A_2 y_m; \quad (20)$$

$$\dot{\chi}_1 = \chi_2, \dot{\chi}_2 = \chi_3, \dots, \dot{\chi}_{n_{ck}} = \Psi_{ck}^i - \Psi_{ckm}^i = A_4 x - A_4 x_m, \quad (21)$$

где n_{tr} – число интеграторов, обеспечивающих астатизм порядка $n_{tr} - 1$ по траекторной ошибке; n_{ck} – число интеграторов, обеспечивающих астатизм порядка $n_{ck} - 1$ по скоростной ошибке; $z_j, j = \overline{1, n_{tr}}$ – дополнительные переменные для обеспечения астатизма при обработке траекторного задания; $\chi_k, k = \overline{1, n_{ck}}$ – дополнительные переменные для обеспечения астатизма при обработке задания по скорости.

Тогда траекторная и скоростная ошибки подвижного объекта задаются в виде

$$e_{tr} = A_1 Y y + A_2 y - A_1 Y_m y_m - A_2 y_m + B_1 z_1 + \dots + B_{n_{tr}} z_{n_{tr}}; \quad (22)$$

$$e_{ck} = A_4 x - A_4 x_m + C_1 \chi_1 + \dots + C_{n_{ck}} \chi_{n_{ck}}, \quad (23)$$

где $B_j, C_k, j = \overline{1, n_{tr}}, k = \overline{1, n_{ck}}$ – матрицы коэффициентов регулятора.

Потребуем, чтобы траекторная и скоростная ошибки удовлетворяли уравнениям

$$\ddot{e}_{tr} + T_2 \dot{e}_{tr} + T_1 e_{tr} = 0; \quad (24)$$

$$\dot{e}_{ck} + T_3 e_{ck} = 0. \quad (25)$$

Первая и вторая производные по времени от выражения (22), вычисленные в силу уравнений динамики и кинематики подвижного объекта и эталонной модели и (20), равны:

$$\dot{e}_{tr} = A_1 R x + A_2 M^{-1} F_d - A_1 R_m x_m - A_2 M^{-1} F_{dm} + B_1 Z_2 + B_2 (\Psi_{tr} - \Psi_{trm}); \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \ddot{e}_{tr} = & A_1 \dot{R} x + A_1 R \dot{x} + A_2 M^{-1} \frac{\partial F_d}{\partial x} \dot{x} + A_2 M^{-1} \frac{\partial F_d}{\partial y} R x - A_1 \dot{R}_m x_m - A_1 R_m \dot{x}_m - \\ & - A_2 M_m^{-1} \frac{\partial F_{dm}}{\partial x_m} \dot{x}_m - A_2 M_m^{-1} \frac{\partial F_{dm}}{\partial y_m} R_m x_m - B_1 (\dot{\Psi}_{tr} - \dot{\Psi}_{trm}) + B_2 (\ddot{\Psi}_{tr} - \ddot{\Psi}_{trm}). \end{aligned} \quad (27)$$

Первая производная по времени от выражения (23) равна

$$\dot{e}_{ck} = A_4 \dot{x} - A_4 \dot{x}_m + C_1 \chi_2 + \dots + C_{n_{ck}-1} \chi_{n_{ck}} + C_{n_{ck}} (A_4 x - A_4 x_m). \quad (28)$$

Подставив выражения (22), (23) и (26)–(28) в уравнения (24) и (25), получим

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} A_1 R + A_2 M^{-1} \frac{\partial F_d}{\partial x} \\ A_4 \end{bmatrix} \dot{x} = \\ & = \begin{bmatrix} A_1 R_m + A_2 M_m^{-1} \frac{\partial F_{dm}}{\partial x_m} \\ A_4 \end{bmatrix} \dot{x}_m + \begin{bmatrix} A_1 \dot{R}_m x_m + A_2 M_m^{-1} \frac{\partial F_{dm}}{\partial y_m} R_m x_m \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}, \\ & f_1 = A_1 \dot{R}x + A_2 M^{-1} \frac{\partial F_d}{\partial x} Rx + B_1(\Psi_{tr} - \Psi_{trm}) + \\ & \quad + B_2(\dot{\Psi}_{tr} - \dot{\Psi}_{trm}) + T_2 \dot{e}_{tr} + T_1 e_{tr}, \\ & f_2 = C_1 \chi_2 + C_2(\Psi_{ck} - \Psi_{ckm}) + T_2 e_{ck}. \end{aligned} \tag{29}$$

С учетом (17) выражение (29) переписывается в виде

$$\begin{bmatrix} A_1 R + A_2 M^{-1} \frac{\partial F_d}{\partial x} \\ A_4 \end{bmatrix} \dot{x} = - \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} f_1 &= A_1 \dot{R}x + A_2 M^{-1} \frac{\partial F_d}{\partial x} Rx + B_1(\Psi_{tr} - \Psi_{trm}) + \\ &+ B_2(\dot{\Psi}_{tr} - \dot{\Psi}_{trm}) + T_2(\dot{e}_{tr} + \dot{\Psi}_{trm}) + T_1(e_{tr} + \Psi_{trm}), \\ f_2 &= C_1 \chi_2 + C_2(\Psi_{ck} - \Psi_{ckm}) + T_2(e_{ck} + \Psi_{ckm}), \\ \dot{e}_{tr} &= \dot{\Psi}_{tr} - \dot{\Psi}_{trm} + B_1 z_2 + B_2(\Psi_{tr} - \Psi_{trm}), \\ e_{tr} &= \Psi_{tr} - \Psi_{trm} + B_1 z_1 + B_2 z_2, \\ e_{ck} &= \Psi_{ck} - \Psi_{ckm} + C_1 \chi_1 + C_2 \chi_2. \end{aligned} \tag{30}$$

Как и для эталонной модели, примем

$$F_u = K_\delta u, \tag{31}$$

где K_δ – матрица размерности $6 \times (\mu + \nu)$.

Из (30) с учетом (2) и (31) находим выражение для вектора управляющих воздействий подвижного объекта (1) и (2).

4. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ АДАПТАЦИИ

Для оценки аддитивных неопределенностей в F_d и матрицах интервальных параметров M и K_δ представим уравнение (2) динамики подвижного объекта в виде

$$\dot{x} = (M_m + \Delta M)^{-1} ((K_{\delta m} + \Delta K_\delta)u + F_{dm} + \Delta F_d) = F_{xm} + \Delta F_x, \quad (32)$$

где ΔM , ΔK_δ , ΔF_d – неопределенные матрицы и вектор, удовлетворяющие ограничениям (3)–(6); $F_{xm} = (M_m)^{-1}(K_{\delta m}u + F_{dm})$ – известный вектор; $\Delta F_x = M_m^{-1}(\Delta K_\delta u + \Delta F_d) + \Delta M^{-1}((K_{\delta m} + \Delta K_\delta)u + F_{dm} + \Delta F_d)$ – неизвестный вектор.

Для синтеза наблюдателя неизвестного вектора ΔF_x воспользуемся подходом, предложенным в работах [17, 18]. В этом подходе реализован редуцированный наблюдатель Луенбергера [19], робастность которого обеспечивается аппроксимацией возмущений временными рядами [20]. В соответствии с методикой синтеза [18] ошибка наблюдателя формируется в виде

$$e_n = \Delta F_x - s(x) - \lambda, \quad (33)$$

где λ – вектор переменных состояния наблюдателя; $s(x)$ – векторная функция.

Потребуем, чтобы ошибка (33) удовлетворяла дифференциальному уравнению

$$\dot{e}_n + T_n e_n = 0,$$

где T_n – матрица наблюдателя, выбираемая из условий устойчивости и быстродействия. Для простоты изложения примем матрицу T_n скалярной, т. е. диагональной с одинаковыми элементами [21].

Дифференцируя выражение (33) по времени в силу уравнения (32), из последнего уравнения получим

$$-\dot{\lambda} - \frac{\partial s(x)}{\partial x} (F_{xm} + \Delta F_x) + T_n (\Delta F_x - s(x) - \lambda) = 0,$$

откуда, приравняв к нулю все слагаемые, содержащие неизвестный вектор ΔF_x , получим

$$\dot{\lambda} = -T_n \lambda - T_n T_n x - T_n F_{xm}, \quad \Delta \hat{F}_x = T_n x + \lambda. \quad (34)$$

Переходя в уравнениях (32) и (34) к изображениям по Лапласу, получим

$$\begin{cases} px = F_{xm} + \Delta F_x, \\ p\lambda = -T_n \lambda - T_n T_n x - T_n F_{xm}, \\ \Delta \hat{F}_x = T_n x + \lambda, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{F_{xm} + \Delta F_x}{p}, \\ \lambda = \frac{-T_n T_n x - T_n F_{xm}}{p + T_n}, \\ \Delta \hat{F}_x = T_n x + \lambda, \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta \hat{F}_x = T_n \frac{F_{xm} + \Delta F_x}{p} - \frac{T_n T_n}{p + T_n} \frac{F_{xm} + \Delta F_x}{p} - \frac{T_n F_{xm}}{p + T_n} \Rightarrow \Delta \hat{F}_x = \frac{T_n}{p + T_n} \Delta F_x. \quad (35)$$

Применив метод коэффициентов ошибок [21], получим

$$E_0 = 0, \quad E_1 = \frac{1}{T_n}, \quad E_2 = \frac{2}{T_n^2}, \dots, \quad E_i = \frac{i!}{T_n^i}.$$

Тогда ошибка оценивания имеет вид

$$\varepsilon_n(t) = \frac{1}{T_n} \Delta \dot{F}_x + \frac{1}{T_n^2} \Delta \ddot{F}_x + \dots + \frac{1}{T_n^i} \Delta F_x^{(i)} + \dots$$

Пусть ΔF_x представляет собой линейный сигнал, удовлетворяющий ограничениям (6). Тогда ошибка оценивания ограничена выражением

$$\left| \varepsilon_n^i(t) \right| \leq \frac{\Delta F_d^{i0}}{T_n}, \quad i = \overline{1, 6}. \quad (36)$$

Выражение (36) позволяет выбрать положительно определенную матрицу T_n так, чтобы ошибка оценивания не превышала заданную величину.

Представим оцениваемую функцию гармоническим сигналом $\Delta F_x = A \sin \omega_{\max} t$, тогда

$$\left| \varepsilon_n^i(t) \right| \leq \frac{A \omega_{\max}}{T_n} + \frac{A \omega_{\max}^2}{T_n^2} + \dots + \frac{A \omega_{\max}^i}{T_n^i} + \dots$$

Из последнего выражения следует, что для ограниченности ошибки требуется выбирать элементы матрицы T_n с учетом условия

$$\frac{\omega_{\max}}{T_n} < 1.$$

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Мультикоптер начинает движение по траектории из начальной точки $x_0 = (10; 6; -5)$. На рассматриваемый объект управления действуют параметрические возмущения: отклонения матрицы M и отклонения элементов матрицы $K_{\delta m}$ от K_{δ} , связанные с неточностью определения зависимостей между тягами винтомоторных групп и управляемых переменных. Отклонения в M – результат действия неучтенных в модели присоединенных масс. При моделировании принято:

$$K_{\delta m} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad K_{\delta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7 \end{bmatrix}, \quad M = 0,9 M_m (1 - 0,002t).$$

В выражении для управления (36) используются номинальные значения параметров и вектор оценок возмущений $M_m, K_{\delta m}, \hat{F}_d$.

Вектор внешних возмущений принят в виде

$$F_d(t) = \begin{bmatrix} 4 \\ 20 + 10\sin(0,5t) \\ -2 \\ -3 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}.$$

Параметры системы управления:

$$T_1 = 1, T_2 = 2, T_3 = 1, B_1 = 100, B_2 = 20, C_1 = 100, C_2 = 20, T_n = 10,$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$A_3 = \left[-\arctan\left(\frac{b_g}{a_g}\right) \quad 0,5V_{x0} \quad -0,5V_{z0} \right]^T,$$

$$A_4 = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad A_5 = -V_{y0},$$

$$\Psi^0 = \begin{cases} \arctg \frac{-a_g}{b_g}, & \text{если } r^0 > r_r; \\ \frac{r^0}{r_r} \left(\arctg \frac{-a_g}{b_g} - \arctg \frac{b_g}{a_g} \right) + \arctg \frac{b_g}{a_g}, & \text{если } r^0 \leq r_r, \end{cases}$$

где r^0 – расстояние до заданной траектории в плоскости OY_1Y_3 , описываемой уравнением $a_g y(1) + b_g y(3) + c_g = 0$; r_r – расстояние, при превышении которого вектор скорости подвижного объекта направлен на ближайшую точку на заданной траектории. Если расстояние до траектории меньше r_r , то подвижный объект начинает разворачиваться вдоль траектории. При моделировании принято: $r_r, a_g = 1, b_g = -1, c_g = 0$. Желаемая высота $y = 10$ м.

Моделирование полета мультикоптера произведено для случаев:

1) управление с наблюдателем (34) T_n ;

2) управление с базовым алгоритмом управления при $B_1 = 100, B_2 = 20, C_1 = 100, C_2 = 20$;

3) управление с базовым алгоритмом управления и наблюдателем.

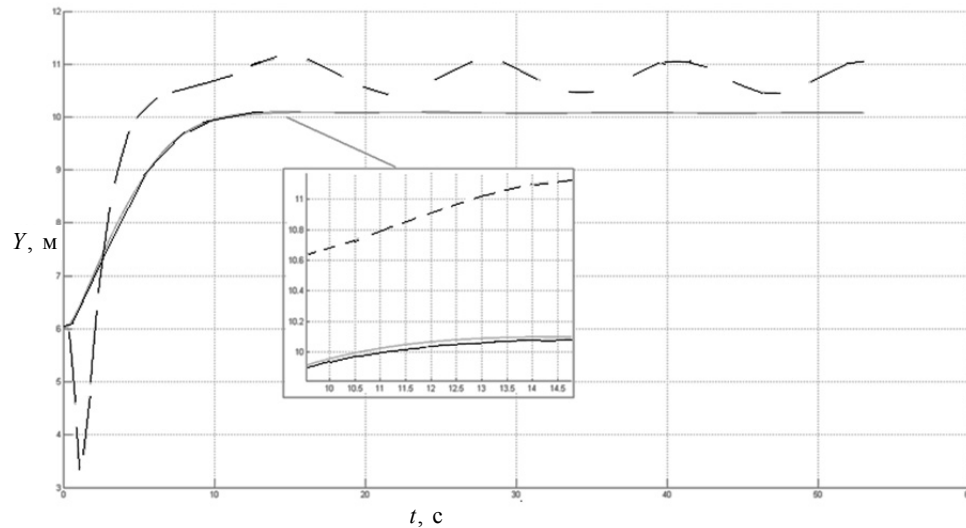


Рис. 1. Высота. Вариант 1 – пунктирная линия, вариант 2 – сплошная серая линия, вариант 3 – сплошная черная линия

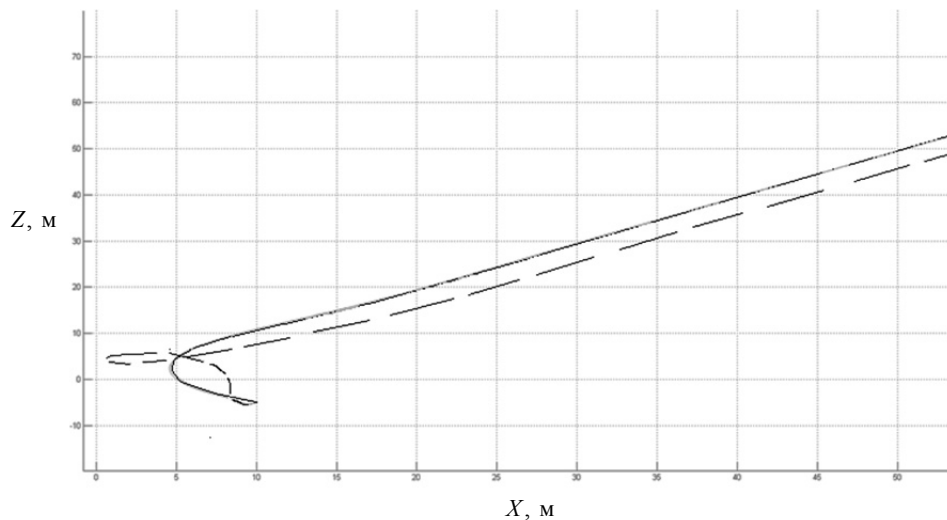


Рис. 2. Траектория полета на плоскости. Вариант 1 – пунктирная линия, вариант 2 – серая линия, вариант 3 – сплошная черная линия

Результаты численных исследований различных вариантов адаптации приведены на рис. 1 и 2. Из рисунков видно, что в первом варианте присутствует ошибка отработки траектории, связанная с неточностью определения параметров модели мультикоптера. Максимальная величина отклонения от заданной траектории составляет 4,89 м. Во втором варианте параметрические возмущения значительно подавляются, но на объект управления действуют внешние возмущения, отклонение 0,49 м. Наиболее заметно влияние внешних возмущений проявляется при значительных ветровых возмущениях, как

показано на рис. 3, где амплитуда внешнего возмущения по x увеличена от 4 до 14.

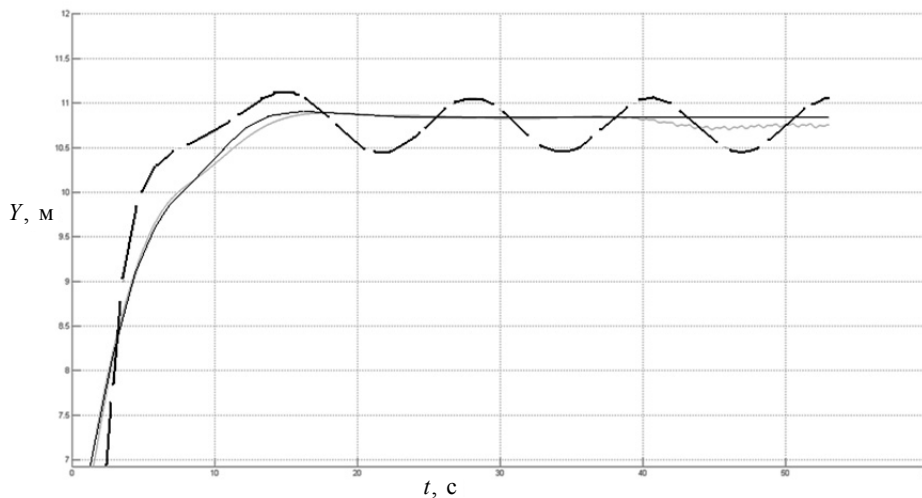


Рис. 3. Удержание высоты. Вариант 1 – пунктирная линия, вариант 2 – сплошная серая линия, вариант 3 – сплошная черная линия

Одновременное применение всех способов адаптации в третьем варианте обеспечивает наибольшую точность замкнутой системы, в этом случае отклонение составило 0,48 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наименьшую точность при подавлении внешних возмущений и совокупности внешних и параметрических возмущений, действующих на мультикоптер, показывает адаптивный алгоритм с оцениванием возмущений. Это связано с тем, что астатизм по каждому каналу обеспечивается динамической системой второго порядка, а оценивание возмущений – наблюдателем первого порядка. Повышение порядка наблюдателя позволяет снизить ошибки замкнутой системы приблизительно до того же уровня, что и в других случаях. Вместе с тем одновременное применение алгоритмов оценивания возмущений, обеспечения астатизма и параметрической адаптации приводит к уменьшению ошибки замкнутой системы. Такой результат обусловлен способом построения замкнутой системы, обеспечивающим независимую настройку различных контуров адаптации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рутковский В.Ю., Крутова И.Н. Принцип построения и некоторые вопросы теории одного класса самонастраивающихся систем с моделью // Самонастраивающиеся системы: труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10–14 декабря 1963 г.). – М., 1965. – С. 46–63.
2. Рутковский В.Ю., Скорин-Чайков В.Н. Самонастраивающиеся системы с пробным сигналом // Самонастраивающиеся системы: труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10–14 декабря 1963 г.). – М., 1965. – С. 93–111.

3. *Zemlyakov S.D.* Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system // Theory of self-adaptive control systems, Teddington, England, 1965: proceedings / ed. by P.H. Hammond. – New-York: Plenum Press, 1966. – P. 175–179.

4. *Рутковский В.Ю.* Работы института проблем управления в области беспилотных адаптивных систем и систем управления космическими аппаратами // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 6. – С. 42–49.

5. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* О некоторых результатах развития теории и практики применения беспилотных адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 7. – С. 103–121.

6. *Рутковский В.Ю., Глумов В.М.* Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. I // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 4. – С. 92–105.

7. *Даденков Д.А., Казанцев В.П.* Синтез электромеханических систем управления с нелинейной адаптивной эталонной моделью // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-7. – С. 1466–1471.

8. *Еремин Е.Л., Пикуль З.Д., Теличенко Д.А.* Адаптивная система управления одним классом структурно-параметрически неопределенных объектов в схеме с явной и неявной эталонными моделями // Информатика и системы управления. – 2015. – № 1 (43). – С. 105–114.

9. Синтез управления в продольном канале маловысотного контура беспилотного вертолета / А.М. Бронников, Е.О. Каравашкина, В.С. Кулабухов, А.Ю. Чекин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 213. – С. 5–12.

10. *Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В., Бахирев И.В.* Исследование системы управления с эталонной моделью и сигнальной настройкой для электроэнергетической газотурбинной установки // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6. – С. 235–240.

11. *Еремин Е.Л.* Модификация адаптивной системы для управления одноканальным объектом с входным насыщением // Информатика и системы управления. – 2016. – № 3 (49). – С. 119–131.

12. *Рутковский В.Ю., Глумов В.М.* Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. II // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 5. – С. 83–95.

13. Моделирование перемещения подвижного объекта с адаптивным позиционно-траекторным управлением и контуром оценивания неизмеряемых параметров модели [Электронный ресурс] / А.Е. Кульченко, М.Ю. Медведев, В.А. Шевченко, В.С. Лазарев // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1. – URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/ivd_8_kulchenko_medvedev.pdf_040e128174.pdf (дата обращения: 21.03.2018).

14. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Крухмалев В.А.* Базовые алгоритмы адаптивного позиционно-траекторного управления подвижными объектами при позиционировании в точке // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – № 4 (16). – С. 219–225.

15. Управление распределенными системами подводной робототехники с использованием адаптивной эталонной модели [Электронный ресурс] / В.Х. Пшихопов, В.А. Шевченко, М.Ю. Медведев, Б.В. Гуренко // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. – URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_3_Gurenko_N.pdf_d9d705ea95.pdf (дата обращения: 21.03.2018).

16. *Медведев М.Ю., Рогов В.А., Медведева Т.Н.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами с многоконтурной адаптацией // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 7. – С. 101–114.

17. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой. Ч. 2. Алгоритмы управления / В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, А.Р. Гайдук, Р.А. Нейдорф, В.Е. Беляев, Р.В. Федоренко, В.А. Костюков, В.А. Крухмалев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 7. – С. 13–20.

18. *Медведев М.Ю.* Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 6. – С. 17–22.

19. *Visy R.* Nonlinear filtering theory // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1965. – Vol. 10, iss. 2. – P. 198.

20. *Красовский А.А.* Циклическое оценивание при первичной обработке сигналов датчиков // Автоматика и телемеханика. – 1988. – № 6. – С. 52–60.

21. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц. – 5-е изд. – М.: Физматлит, 2004. – 560 с.

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

Кульченко Артем Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры Электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – управление подвижными объектами. Имеет более 20 публикаций. E-mail: kulchenko.a.e.work@gmail.com

Шевченко Виктор Александрович, младший научный сотрудник НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – управление подвижными объектами, электроэнергетика. Имеет более 20 публикаций. E-mail: droogg@mail.ru

Лазарев Владимир Сергеевич, магистр техники и технологии, аспирант кафедры Электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – групповое управление подвижными объектами. Имеет более 40 публикаций. E-mail: vlazarev@sfedu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-137-152

A multiloop adaptive control for multicopters*

M.YU. MEDVEDEV¹, A.E. KULCHENKO², V.A.SHEVCHENKO³, V.S. LAZAREV⁴

¹ *Southern Federal University, 2, Shevchenko Street, Taganrog, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: medvmihal@sfedu.ru*

² *Southern Federal University, 2, Shevchenko Street, Taganrog, Russian Federation, Ph.D. E-mail: kulchenko.a.e.work@gmail.com*

³ *Southern Federal University, 2, Shevchenko Street, Taganrog, Russian Federation, junior researcher. E-mail: droogg@mail.ru*

⁴ *Southern Federal University, 2 Shevchenko Street, Taganrog, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: vlazarev@sfedu.ru*

The paper gives a brief overview of the methods of searchless adaptive control including reference models. A general form of the mathematical model of the multicopter is given. It describes the synthesis of the multicopter reference model. The synthesis of the reference model of the quadcopter is given. The vehicle model and the reference model have a similar structure, with the parameters of the reference model being known. The synthesis of the nominal model control makes it possible to correctly form the matrices of the coefficients of the trajectory error equations and motion velocity errors. It also makes it possible to estimate the difference between the multicopter and its reference model based on the difference between nominal control and real values of the control forces and moments applied to the vehicle. The paper considers control systems based on adaptive control algorithms with reference models, astaticism and disturbance estimation. In this work we use a loop with astaticism, an asymptotic disturbance estimator, and a parametric adaptation loop to take into account parametric perturbations of the model and external perturbations (for example, wind disturbances). Additional integrators to provide astaticism in the vehicle closed control system are introduced. The simulation results of the multicopter flight along the trajectory are presented with the use of various adaptation loops separately and jointly. In connection with the fact that constant wind disturbances act on the multicopter, the external perturbation vector is represented as a periodic function. The cases with the most noticeable deviations of the flight trajectory for different modes of adaptation are analyzed. Parametric deviations in the simulation are caused by the inaccuracy

* Received 14 February 2018.

The work was supported by the RFBR Grant № 16-08-00013 at the Southern Federal University, Russia.

cy in determining the dependencies between the thrusts of engine-propeller units and controlled variables as well as by an unaccounted added mass of the vehicle.

Keywords: multicopter, vehicle, position-trajectory control, astaticism, estimator, adaptive control, adaptation, disturbance estimation

REFERENCES

1. Rutkovskii V.Yu., Krutova I.N. [The principle of construction and some problems of the theory of one class of self-adjusting systems with model]. *Samonastravayushchiesya sistema: trudy I Vsesoyuznoi konferentsii po teorii i praktike samonastravayushchikhsya sistem* [Self-adjusting systems: proceedings of the I All-Union conference on the theory and practice of self-tuning systems], 10–14 December, 1963. Moscow, 1965, pp. 46–63. (In Russian).
2. Rutkovskii V.Yu., Krutova I.N. [A self-tuning system with the test signal]. *Samonastravayushchiesya sistema: trudy I Vsesoyuznoi konferentsii po teorii i praktike samonastravayushchikhsya sistem* [Self-adjusting systems: proceedings of the I All-Union conference on the theory and practice of self-tuning systems], 10–14 December, 1963. Moscow, 1965, pp. 93–111. (In Russian).
3. Zemlyakov S.D. Some problems of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. *Theory of self-adaptive control systems*, Teddington, England, 1965: proceedings. New York, Plenum Press, 1966, pp. 175–179.
4. Rutkovskii V.Yu. Raboty instituta problem upravleniya v oblasti bespoiskovykh adaptivnykh sistem i sistem upravleniya kosmicheskimi apparatami [The Institute of problems of management in the field of instant adaptive systems and control systems of spacecraft]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 1999, no. 6, pp. 42–49. (In Russian).
5. Zemlyakov S.D., Rutkovskii V.Yu. O nekotorykh rezul'tatakh razvitiya teorii i praktiki primene-niya bespoiskovykh adaptivnykh sistem [About some results of the theory and practice of application of the instant adaptive systems]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2001, no. 7, pp. 103–121. (In Russian).
6. Rutkovskii V.Yu., Glumov V.M. Osobennosti dinamiki adaptivnoi sistemy upravleniya s nelineinoy etalonnoy model'yu. I [Dynamical properties of an adaptive control system with a nonlinear reference model. I]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2017, no. 4, pp. 92–105. (In Russian).
7. Dadenkov D.A., Kazantsev V.P. Sintez elektromekhanicheskikh sistem upravleniya s nelineinoy adaptivnoy etalonnoy model'yu [Synthesis of electromechanical control systems with a nonlinear adaptive reference model]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2014, no. 11, pp. 1466–1471.
8. Eremin E.L., Pikul' Z.D., Telichenko D.A. Adaptivnaya sistema upravleniya odnim klassom strukturno-parametricheski neopredelennykh ob'ektov v skheme s yavnoi i neyavnoi etalonnymi modelyami [Adaptive control system of one class of structurally-parametrically indeterminate objects in a scheme with explicit and implicit reference models]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2015, no. 1 (43), pp. 105–114.
9. Bronnikov A.M., Karavashkina E.O., Kulabukhov V.S., Chekin A.Yu. Sintez upravleniya v prodol'nom kanale malovysotnogo kontura bespilotnogo vertoleta [Synthesis of control in the longitudinal channel of a low-altitude contour of an unmanned helicopter]. *Nauchnyi Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviatsii – Civil Aviation High TECHNOLOGIES*, 2015, no. 213, pp. 5–12.
10. Ziyatdinov I.R., Kavalero B.V., Bakhirev I.V. Issledovanie sistemy upravleniya s etalonnoy model'yu i signal'noi nastroiko dlya elektroenergeticheskoi gazoturbinnoy ustanovki [The investigation of the control system with a reference model and signal setting for the electric power gas-turbine unit]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2015, no. 6, pp. 235–240.
11. Eremin E.L. Modifikatsiya adaptivnoi sistemy dlya upravleniya odnokanal'nym ob'ektom s vkhodnym nasyshcheniem [Modification of the adaptive system for controlling a single-channel object with input saturation]. *Informatika i sistemy upravleniya – Information Science and Control Systems*, 2016, no. 3 (49), pp. 119–131.
12. Rutkovskiy V.YU., Glumov V.M., Osobennosti dinamiki adaptivnoy sistemy upravleniya s nelineynoy etalonnoy model'yu [Dynamics characteristics of an adaptive control system with a nonlinear reference model]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2017, no. 5, pp. 83–95.

13. Kul'chenko A.E., Medvedev M.Yu., Shevchenko V.A., Lazarev V.S. Modelirovanie peremeshcheniya podvizhnogo ob"ekta s adaptivnym pozitsionno-traektnym upravleniem i konturom otsenivaniya neizmeryaemykh parametrov modeli [Simulation of vehicle movements with adaptive positional-trajectory control system and estimation loop of immeasurable model parameters]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2017, no. 1. Available at: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/ivd_8_kulchenko_medvedev.pdf_040e128174.pdf (accessed 21.03.2018).
14. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Kpukhmalev V.A. Bazovye algoritmy adaptivnogo pozitsionno-traektnogo upravleniya podvizhnymi ob"ektami ppi pozitsionirovani v toчке [Basic algorithms of adaptive position-trajectory control of mobile objects in positioning at a point]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2015, no. 4 (16), pp. 219–225.
15. Pshikhopov V.Kh., Shevchenko V.A., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Upravlenie raspredelennymi sistemami podvodnoi robototekhniki s ispol'zovaniem adaptivnoi etalonnoi modeli [Control of distributed underwater robot systems using reference adaptive model]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2017, no. 2. Available at: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_3_Gurenko_N.pdf_d9d705ea95.pdf (accessed 21.03.2018).
16. Medvedev M.Yu., Rogov V.A., Medvedeva T.N. Pozitsionno-traektnoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami s mnogokonturnoi adaptatsiei [Position-trajectory control of mobile objects with multi-contour adaptation]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2016, no. 7, pp. 101–114.
17. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Neidorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhamlev V.A. Sistema pozitsionno-traektnogo upravleniya robotizirovannoi vozdukhoplavatel'noi platformoi. Ch. 2. Algoritmy upravleniya [System of position-trajectory control for robotic airship. Part 2. Control algorithms]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2013, no. 7, pp. 13–20.
18. Medvedev M.Yu. Algoritmy adaptivnogo upravleniya ispolnitel'nymi privodami [Algorithms of adaptive control of actuators]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2006, no. 6, pp. 17–22.
19. Bucy R. Nonlinear filtering theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, vol. 10, iss. 2, p. 198.
20. Krasovskiy A.A. Tsiklichesкое otsenivanie pri pervichnoi obrabotke signalov datchikov [Cyclic estimation in primary filtering of sensor signal]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 1988, no. 6, pp. 52–60. (In Russian).
21. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Theory of matrices]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 560 p.

Для цитирования:

Многоконтурное адаптивное управление мультикоптерами / М.Ю. Медведев, А.Е. Кульченко, В.А. Шевченко, В.С. Лазарев // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 137–152. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-137-152.

For citation:

Medvedev M.Yu., Kulchenko A.E., Shevchenko V.A., Lazarev V.C. Mnogokonturnoe adaptivnoe upravlenie mul'tikopterami [A multiloop adaptive control for multicopters]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 137–152. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-137-152.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 519.224.22

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-153-166

Методика расчета распределения вероятностей значений симметричных аддитивно разделяемых статистик, приближенных к их точному распределению*

А.К. МЕЛЬНИКОВ

117587, РФ, г. Москва, Варшавское шоссе, 125, стр. 17, НТЦ ЗАО «ИнформИнвест-Групп», кандидат технических наук, доцент. E-mail: ak@iigroup.ru

В работе в интересах разработки процедур обработки текстов рассматривается возможность использования точных распределений вероятностей значений статистик для построения статистических критериев согласия с равновероятным распределением. Проводится сравнение вычислительной сложности расчета точных распределений методом полного перебора и частотным методом. Показывается, что вычислительная сложность частотного метода расчета точных распределений намного меньше вычислительной сложности метода полного перебора, но и она не позволяет провести за приемлемое время вычисления точных распределений на современных высокопроизводительных вычислительных системах для практически значимых значений параметров текстов даже при кардинальной модернизации вычислительных систем путем применения новейших вычислительных элементов. За счет сужения класса используемых статистик до класса симметричных аддитивно разделяемых статистик проведен выбор направления модернизации частотного метода расчета точных распределений, заключающийся в ограничении перебираемого выборочного пространства. Показана принципиальная возможность применения модернизированного метода в областях значений параметров текстов, где высокая вычислительная сложность частотного метода не позволяет выполнить расчет точных распределений. На основе результатов по оценке вероятности значений статистики максимальной частоты проведена модернизация частотного метода расчета точных распределений, в результате которой разработана методика расчета Δ -точных распределений, которые отличаются от точных распределений не более чем на заранее заданную величину Δ . Описана пошаговая детализация методики расчета Δ -точных распределений, позволяющая применять ее для проведения практических расчетов. Приводятся конкретные результаты по применению методики расчета Δ -точных распределений для значений параметров текстов, расчет точных распределений для которых на современном этапе невозможен из-за его большой вычислительной сложности.

Ключевые слова: вероятность, статистика, критерий, точное распределение, предельное распределение, вычислительная сложность метода, производительность многопроцессорной вычислительной системы.

* Статья получена 02 октября 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

При построении информационных моделей задач обработки текстов [1] для выделения их из массивов, знаки в которых распределены случайным равновероятным образом, часто используются статистические критерии согласия с равновероятным распределением.

Пусть из некоторого массива, состоящего из M текстов длиной n , содержащих знаки алфавита $A_N = \{a_1, \dots, a_N\}$ мощностью N ,

$$T_{n,N}(j) = \{t_1(j), \dots, t_n(j)\}, \quad j = \overline{1, M},$$

нужно отобрать тексты, являющиеся реализациями случайных выборок длины n из равновероятного распределения на алфавите мощностью N .

Отбор текстов с равновероятным распределением знаков производится с помощью применения критерия согласия с равновероятным распределением [2], использующим некоторую статистику S_n текста длины n , являющуюся функцией от h_i частот встречаемости знаков (исходов) текста a_i из алфавита A_N мощности N :

$$S_n = f(n, N).$$

Часть ложно отобранных как равновероятные текстов, содержащих неравновероятное распределение знаков, определяет размер применяемого критерия α [3].

Для определения размера критерия α необходимо знать вероятность распределения значений применяемой в критерии статистики S_n :

$$P\{S_n \geq c\},$$

связанного с размером критерия α соотношением [4]:

$$P\{S_n \geq c\} = \alpha.$$

В статистическом критерии согласия могут использоваться как точные распределения значений вероятности (точные распределения) статистики S_n , расчету которых посвящены работы автора [5, 6], так и предельные распределения вероятности значений (предельные распределения) статистики S_n , определяемые свойствами самой функциями f , например, как это показано Хельмертом [7] и Пирсоном [8].

Целью данной работы является выбор направления и обоснование возможности модернизации метода вычисления точных распределений вероятности значений симметричных аддитивно делимых статистик, позволяющего вычислять распределения вероятности значений указанных статистик, сколь угодно близкие к их точным распределениям, а также разработка методики этого расчета.

1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ЗНАЧЕНИЙ СТАТИСТИК

В работах автора [5, 6] уже исследовался вопрос расчета точных распределений статистики S_n хи-квадрат χ_n , предложенной в работе [9] и исследуемой Карлом Пирсоном в [8, 10]:

$$\chi_n = \sum_{i=1}^N \frac{(h_i - np_i)^2}{np_i},$$

где h_i – частота встречаемости знака (исхода) a_i ; n – длина текста (объем выборки); N – число исходов полиномиальной схемы (мощность алфавита A_N) и p_i – вероятность a_i -го исхода.

В работе автора [5] расчеты точных распределений статистики χ_n исследовались в общем случае, без учета свойств класса статистик, к которым она принадлежит. Показано, что вычислительная сложность такого расчета методом полного перебора для параметров текстов (n, N) сопоставима со сложностью перечисления всех текстов $T_{n,N}(j)$ длины n в алфавите мощностью N и оценивается как $O(N^n)$, что не позволяет проводить расчеты за приемлемое время для практических значений параметров.

В работе автора [6] расчеты точных распределений статистики χ_n исследовались с учетом свойств класса симметричных аддитивно разделимых статистик, к которым принадлежит статика χ_n . Показано, что вычислительная сложность такого расчета для параметров текстов (n, N) с использованием частотного метода сопоставима со сложностью перечисления всех решений уравнения

$$h_1 + \dots + h_N = n \tag{1}$$

в целых неотрицательных числах, т. е. $0 \leq h_i \leq n$. Число таких решений уравнения (1) согласно [11] равно числу сочетаний с повторениями из N элементов по n :

$$\binom{N+n-1}{n}.$$

Отметим, что с каждым решением уравнения (1) связано

$$N^n / \binom{N+n-1}{n}$$

текстов $T_{n,N}(j)$ длины n в алфавите мощностью N .

Максимальные значения параметров текстов (n, N) , для которых могут быть рассчитаны точные распределения статистик S_n методом полного перебора и частотным методом, рассчитаны в работах [5, 6] и приведены на рисунке.

Области параметров расчета точных распределений

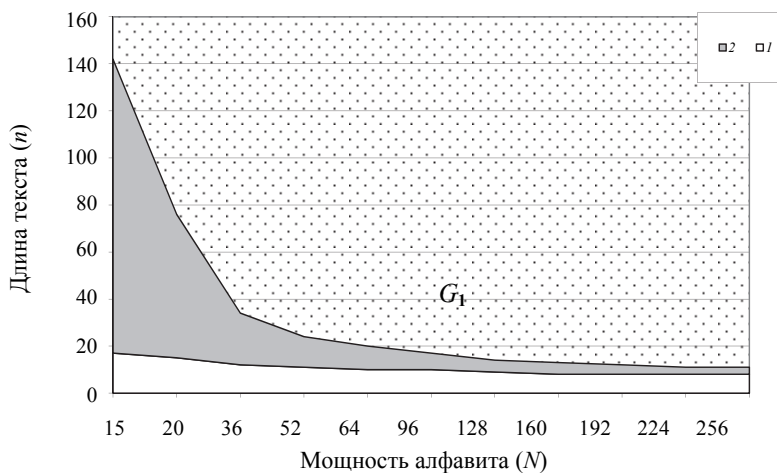


Диаграмма параметров, для которых могут быть рассчитаны точные распределения:

1 – методом полного перебора, 2 – частотным методом

Хотя вычислительная сложность частотного метода расчета точных распределений вероятностей значений статистик намного меньше вычислительной сложности метода полного перебора, но и она не позволяет за приемлемое время провести вычисления точных распределений на современных высокопроизводительных вычислительных системах [11, 12] для практически значимых значений параметров текстов $n > 50$, $N > 64$ даже при их кардинальной модернизации [13].

2. НАПРАВЛЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ЧАСТОТНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ТОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЗНАЧЕНИЙ СТАТИСТИК

Частотный метод расчета точных распределений вероятностей значений статистик, имеющий наименьшую из рассматриваемых методов расчета точных распределений вычислительную сложность, не дает возможности провести расчет в интересующих областях изменения параметров (n, N) . Это происходит из-за того, что при переборе всех возможных решений уравнения (1) каждое h_i перебирается в следующем диапазоне натуральных (целых положительных) чисел

$$\{h_i \mid i = \overline{1, N}, h_i \in \mathbb{N}, 0 \leq h_i \leq n\}, \quad (2)$$

что определяет область перебора решений.

Интуитивно ясно, что тексты, частотные характеристики которых (h_1, \dots, h_N) мы изучаем, при равновероятном распределении знаков могут состоять только из одного какого-либо знака a_i алфавита $A_N = \{a_1, \dots, a_N\}$ либо только из двух знаков алфавита A_N и т. д. Данное предположение ин-

терпретируется следующим образом: очень маловероятны решения уравнения (1) следующих видов:

$$\begin{bmatrix} h_1 = n \\ h_2 = 0 \\ \dots \\ h_N = 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} h_1 = 0 \\ h_2 = n \\ h_3 = 0 \\ h_N = 0 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} h_1 = 0 \\ h_2 = 0 \\ \dots \\ h_N = n \end{bmatrix}$$

либо

$$\begin{bmatrix} h_1 = n - 1 \\ h_2 = 1 \\ h_3 = 0 \\ \dots \\ h_N = 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} h_1 = n - 1 \\ h_2 = 0 \\ h_3 = 1 \\ h_4 = 0 \\ h_N = 0 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} h_1 = n - 1 \\ h_2 = 0 \\ \dots \\ h_{N-1} = 0 \\ h_N = 1 \end{bmatrix}$$

и так далее.

Следовательно, для поиска возможности расчета точных распределений частотным методом [6] необходимо некоторым образом ограничить область перебора решений (2) уравнения (1) некоторым значением m :

$$\{h_i \mid i = \overline{1, N}, h_i \in N, 0 \leq h_i \leq m, m < n\}. \quad (3)$$

Будем учитывать, что ограничение области перебора может привести к потере точности рассчитанного распределения вероятностей значений статистик в том смысле, что оно будет отличаться от точного распределения, которое мы посчитать не имеем возможности.

Рассмотрение вопроса ограничения области перебора (2) приводит нас к рассмотрению поведения статистики максимальной частоты M_n , связанной с параметрами области перебора (h_1, \dots, h_N) следующим образом:

$$M_n = \max_{i=1}^N h_i.$$

Опираясь на известное утверждение теории вероятности (в частности, см. [14])

$$P(A) = P(AB) + P(\overline{AB}),$$

выпишем равенство для вероятностей значений статистики с учетом возможных ограничений (3) области перебора

$$P\{S_n \geq c\} = P\{S_n \geq c, M_n > m\} + P\{S_n \geq c, M_n \leq m\}. \quad (4)$$

Если удастся подобрать m так, чтобы

$$P\{S_n \geq c, M_n > m\} \leq \Delta, \quad (5)$$

то

$$|P\{S_n \geq c\} - P\{S_n \geq c, M_n \leq m\}| = P\{S_n \geq c, M_n > m\}, \quad (6)$$

и по нашему предположению (выражение (5))

$$|P\{S_n \geq c\} - P\{S_n \geq c, M_n \leq m\}| \leq \Delta. \quad (7)$$

Следовательно, вместо вычисления вероятностей значений статистики S_n на всей области значений (2) $P\{S_n \geq c\}$ (точного распределения) можно будет вычислять вероятности значений статистики S_n на ограниченной области (3) $P\{S_n \geq c, M_n \leq m\}$, и вычисленные вероятности не будут отличаться от вероятностей, вычисленных на всей области значений, более чем на величину Δ . В отличие от точного значения вероятности $P\{S_n \geq c\}$ вероятность $P\{S_n \geq c, M_n \leq m\}$ будем называть Δ -точной, а соответствующее ей распределение вероятностей по аналогии с [16] – Δ -точным распределением.

Остается обсудить вопрос о том, как ограничить область перебираемых значений, т. е. как выбрать m так, чтобы $P\{S_n \geq c, M_n > m\} \leq \Delta$.

Вероятность $P\{M_n > m\}$ может быть вычислена с помощью рекуррентной формулы Б.И. Селиванова, предложенной им в 70-х годах XX века и впервые опубликованной в трудах МГУ им. М.В. Ломоносова.

$$P\{M_{n+1} < m\} = \sum_{v=0}^n \binom{n}{v} P\{M_{n-v} < m\} d_{v+1}^{(m)} \frac{1}{N^v} \quad (8)$$

с начальным условием $P\{M_0 < m\} = 1$, где $\binom{n}{v} = \frac{n!}{v!(n-v)!}$ – биномиальный

коэффициент, а коэффициенты $d_{v+1}^{(m)}$ вычисляются по следующей рекуррентной формуле:

$$d_{v+1}^{(m)} = - \sum_{v=1}^{m-1} \binom{n}{v} d_{n+1-v}^{(m)} \quad (9)$$

с начальным условием

$$\begin{aligned} d_1^{(m)} &= 1, \\ d_2^{(m)} &= d_3^{(m)} = \dots = d_{m-1}^{(m)} = 0, \\ d_m^{(m)} &= -1, \\ d_{m+1}^{(m)} &= m. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, заранее задав точность Δ , например 10^{-5} , и используя соотношения (8), (9) и (10), можем подобрать значение m , для которого $P\{M_n < m\} < 1 - \Delta$. Например, для $n = 50$, $N = 26$ и $\Delta = 10^{-5}$ $P\{M_{50} < 12\} = 0,9999992$ и соответственно $m = 12$. Следовательно, область перебора решений уравнения (2) для расчета вероятностей уменьшена с

$$\{h_i \mid i = \overline{1, 26}, h_i \in N, 0 \leq h_i \leq 50\}$$

до

$$\{h_i \mid i = \overline{1, 26}, h_i \in N, 0 \leq h_i \leq 12\}.$$

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА Δ -ТОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ЗНАЧЕНИЙ СТАТИСТИК

Для применения модернизированного частотного метода определим μ_v как число значений h_i из уравнения (1), равных v . Тогда для расчета вероятностей от перечисления решений уравнения (1)

$$h_1 + \dots + h_N = n$$

можно перейти к перебору решений системы уравнений

$$\begin{cases} \mu_0 + \mu_1 + \dots + \mu_n = N, \\ 1\mu_1 + 2\mu_2 + \dots + n\mu_n = n. \end{cases} \quad (11)$$

Учитывая ограничения (3) на область перебора решений уравнения (1) получаем, что при принятых ограничениях

$$\mu_{m+1} = \mu_{m+2} = \dots = \mu_n = 0 \quad (12)$$

можно от перебора решений системы уравнений (11) перейти к перебору усеченной системы уравнений ($m < n$):

$$\begin{cases} \mu_0 + \mu_1 + \dots + \mu_m = N, \\ 1\mu_1 + 2\mu_2 + \dots + m\mu_m = n. \end{cases} \quad (13)$$

Выделяя независимые переменные и применяя метод их последовательного задания с определением зависимых переменных, получаем все решения системы (13):

$$\{\mu^{(i)} \mid (\mu_0^{(i)}, \mu_1^{(i)}, \dots, \mu_m^{(i)}), i = \overline{1, Z}\}. \quad (14)$$

Для рассматриваемого примера при $n = 50$, $N = 26$ и $\Delta = 10^{-5}$ $P\{M_{50} < 12\} = 0,9999992$ и соответственно $m = 12$, а вычисленное $Z = 92\,154$, что намного меньше, чем сложность просто частотного метода, равная числу сочетаний с повторениями из N элементов по n и оцениваемая как $5 \cdot 10^{19}$. Расчеты проводились с помощью программ, составленных на высокоуровневом языке Python [17] 64-битной версии 3.5.1 с использованием модуля `decimal` для работы с числами большой разрядности.

Заметим, что в соответствии с [18] с каждым решением системы (13) связано

$$K^{(i)} = \frac{N!}{\mu_0^{(i)}! \mu_1^{(i)}! \dots \mu_m^{(i)}!} \quad (15)$$

решений уравнения (1). Тогда $P^{(i)}$ – вероятность того, что решение уравнения (11)

$$\left(\mu_0^{(i)}, \mu_1^{(i)}, \dots, \mu_n^{(i)} \right)$$

примет значение $\mu^{(i)}$ из (14), равна

$$P^{(i)} = K^{(i)} \frac{n!}{(2!)^{\mu_2^{(i)}} \cdot (3!)^{\mu_3^{(i)}} \cdot \dots \cdot (m!)^{\mu_m^{(i)}} \cdot N^n} \quad (16)$$

Теперь для каждого $\{\mu^{(i)} \mid i = \overline{1, Z}\}$ мы можем вычислить $P^{(i)}$ и значение статистики $S_n^{(i)}$, например $\chi_n^{(i)}$, где

$$\chi_n^{(i)} = \chi_n(\mu^{(i)}) = \frac{N}{n} \sum_{v=0}^m \mu_v^{(i)} \left(v - \frac{n}{N} \right)^2. \quad (17)$$

Имея вычисленные $\{\mu^{(i)}, P^{(i)}, S_n^{(i)} \mid i = \overline{1, Z}\}$, можно перейти непосредственно к вычислению вероятностей $P\{S_n \geq c\}$. Для этого для всех

$$\left\{ c_j \mid j = 1, 2, \dots, \max_{i=1}^Z S_n^{(i)} \right\}$$

вычисляем

$$P\{S_n \geq c_j\} = \sum_{i=1}^Z P^{(i)} \cdot I(S_n^{(i)}, c_j),$$

где

$$I(S_n^{(i)}, c_j) = \begin{cases} 1 & \text{при } S_n^{(i)} \geq c_j, \\ 0 & \text{при } S_n^{(i)} < c_j. \end{cases}$$

Таким образом, вычисленная последовательность

$$\left\{ P\{S_n \geq c_j\}, j = 1, 2, \dots, \max_{i=1}^Z S_n^{(i)} \right\}$$

является дискретным распределением статистики S_n , отличающимся от точного распределения не более чем на заданную величину Δ .

После проведенных рассуждений можно перейти к формализации методики расчета Δ -точных распределений вероятностей значений симметричных аддитивно делимых статистик.

Пусть n – длина выборки (текста) и N – мощность алфавита текста. Точное распределение вероятностей значений статистики $S_n - P_T\{S_n \geq c\}$ мы рассчитать не можем, поэтому нам надо рассчитать Δ -точное распределение $P_\Delta\{S_n \geq c\}$, отличающееся от точного не более чем на заданную величину Δ :

$$|P_T\{S_n \geq c\} - P_\Delta\{S_n \geq c\}| \leq \Delta.$$

Для этого предпринимаем следующие шаги, которые и составляют суть методики.

Шаг 1. По заданным (n, N) и выбранной точности Δ (например, 10^{-5}) для ограничения области перебора решений уравнения и нахождения m по формулам (8), (9) и (10) последовательно вычисляем

$$P\{M_1 < 2\}, P\{M_2 < 2\}, \dots, P\{M_n < 2\},$$

$$P\{M_1 < 3\}, P\{M_2 < 3\}, \dots, P\{M_n < 3\},$$

$$P\{M_1 < m\}, P\{M_2 < m\}, \dots, P\{M_n < m\},$$

пока не выполнится условие $P\{M_n < m\} > 1 - \Delta$. Таким образом определяем m .

Шаг 2. Для перечисления всех решений системы уравнений

$$\begin{cases} \mu_0 + \mu_1 + \dots + \mu_m = N, \\ 1\mu_1 + 2\mu_2 + \dots + m\mu_m = n \end{cases}$$

выделяем независимые переменные и применяем метод их последовательного задания с определением зависимых переменных. Получаем все Z решений

$$\{\mu^{(i)} | (\mu_0^{(i)}, \mu_1^{(i)}, \dots, \mu_m^{(i)}), i = \overline{1, Z}\}.$$

Шаг 3. Для каждого решения

$$\{\mu^{(i)} | (\mu_0^{(i)}, \mu_1^{(i)}, \dots, \mu_m^{(i)}), i = \overline{1, Z}\}$$

вычисляем значение статистики $S_n^{(i)}$ (например, по формуле (17)), а по формулам (15) и (16) – вероятность его появления $P^{(i)}$. Таким образом, имеем вычисленные решения уравнения $\mu^{(i)}$, значения статистики от этих решений $S_n^{(i)}$ и их вероятности $P^{(i)} - \{\mu^{(i)}, S_n^{(i)}, P^{(i)} | i = \overline{1, Z}\}$. Необходимо отметить, что формулы расчета значений одной и той же статистики от значений частот встречаемости знаков h_i и от значений так называемых «вторых» маркировок μ_ν отличаются друг от друга. Этот факт необходимо учитывать при проведении расчетов.

Шаг 4. Для получения распределения вероятностей значений $P\{S_n \geq c_j\}$ маркируем значения статистики $\{S_n^{(i)} | i = \overline{1, Z}\}$ в интервалах $\{c_j | j = 1, 2, \dots, \max_{i=1}^Z S_n^{(i)}\}$ с одновременным суммированием соответствующих $P^{(i)}$.

Описание методики окончено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены направление и возможность модернизации частотного метода расчета точных распределений значений симметричных аддитивно разделимых статистик для его применения в области значений параметров, для которых частотный метод не может быть применим из-за его большой вычислительной сложности.

Показана возможность применения модернизированного частотного метода для расчета распределений значений симметричных аддитивно разделимых статистик, отличающихся от точных распределений не более чем на заранее заданную величину Δ .

На основе модернизации частотного метода разработана методика расчета Δ -точных распределений, отличающихся от точных распределений не более чем на заранее заданную величину.

Показана возможность применения методики расчета Δ -точных распределений для областей значений параметров статистической выборки (тек-

стов), для которых точные распределения не могут быть рассчитаны из-за своей большой вычислительной и временной сложности.

Приводятся результаты расчета Δ -точных распределений для конкретных значений параметров выборки.

Необходимость проведения статистического анализа текстов на всем практическом спектре их параметров требует исследования сложности методики расчета Δ -точных распределений для областей значений параметров текстов, в которых не могут быть применены предельные распределения, что является предметом дальнейших исследований автора.

Благодарность

Автор выражает глубокую благодарность доктору физико-математических наук, профессору А.Ф. Ронжину за постоянное внимание к работе и ее обсуждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чеповский А.М.* Информационные модели в задачах обработки текстов на естественных языках. – М.: ИНТУИТ, 2015. – 228 с. – ISBN 978-5-9556-0176-2.
2. *Крамер Г.* Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
3. *Ивченко Г.И., Медведев Ю.И.* Введение в математическую статистику. – М.: Ленард, 2017. – 608 с. – ISBN 978-5-9710-4535-9.
4. *Ивченко Г.И., Медведев Ю.И.* Математическая статистика. – М.: Либроком, 2014. – 352 с. – ISBN 978-5-397-04141-6.
5. *Зелюкин Н.Б., Мельников А.К.* Сложность расчета точных распределений вероятности значений статистик и область применения предельных распределений // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 2. – С. 84–90.
6. *Мельников А.К.* Сложность расчета точных распределений вероятности симметричных аддитивно разделяемых статистик и область применения предельных распределений // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 126–130.
7. *Helmert P.R.* Über die Wahrscheinlichkeit von Potenzsummen der Beobachtungsfehler und über einige damit im Zusammenhange stehende Fragen // Zeitschrift für Mathematik und Physik. – 1876. – В. 21. – S. 102–219.
8. *Neyman F., Pearson E.S.* On the use and interpretation of certain test criteria for purposes of statistical inference // Biometrika. – 1928. – Vol. 20-A. – P. 175–240; 264–299.
9. *Pearson K.* On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables in such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. – 1900. – Vol. 50, N 302. – P. 157–170.
10. Exact and approximate distributions of the chi-squared statistic for equiprobability / P.F. Smith, D.S. Rae, R.W. Manderscheid, S. Silbergeld // Communications in Statistics – Simulation and Computation. – 1979. – Vol. 8 (2). – P. 131–149.
11. *Корнеев В.В.* Вычислительные системы. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 512 с. – ISBN 5-85438-117-6.
12. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А.* Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС // Интеллект & Технологии. – 2014. – № 1 (7). – С. 40–47.
13. *Мельников А.К.* Исследование путей модернизации реконфигурируемых вычислительных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 12 (161). – С. 83–89.
14. *Холл М.* Комбинаторика. – М.: Мир, 1970. – 424 с.
15. *Феллер В.* Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2 т. Т. 1. – М.: Мир, 1984. – 528 с.

16. Мельников А.К., Ронжин А.Ф. Обобщенный статистический метод анализа текстов, основанный на расчете распределений вероятности значений статистик // Информатика и ее применения. – 2016. – Т. 10, вып. 4. – С. 89–95.

17. Описание языка программирования Python [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.python.org/doc/> (дата обращения: 22.03.2018).

18. Сачков В.Н. Комбинаторные методы дискретной математики. – М.: Наука, 1977. – 320 с.

Мельников Андрей Кимович, кандидат технических наук, главный научный сотрудник Научно-технического центра ЗАО «ИнформИнвестГрупп». Основные направления научных исследований: применение точных и предельных распределений при построении статистических критериев, организация обработки сообщений на многопроцессорных вычислительных системах, разработка методов и языков программирования. Имеет более 60 научных публикаций. E-mail: ak@iigroup.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-153-166

Processing complexity of exact probability distributions of symmetrical additively partitioned statistics and the application area of limit distributions*

A.K. MELNIKOV

STC CLSC "InformInvestGroup", 125, Varshavskoye Road, building 17, Moscow, 117587, Russian Federation, PhD (Eng.), SAC associate professor; chief research officer. E-mail: ak@iigroup.ru

In the paper, in order to develop some text processing procedures we consider a possibility of using exact distributions of statistical probabilities for creating statistical goodness-of-fit tests with an equiprobable distribution. We compare the computational complexity of exact distributions using the trivial method of full enumeration and the frequency method. It is proved that the computational complexity of the frequency method of exact distribution calculation is considerably lower than the computational complexity of the method of full enumeration. However, it also does not allow calculation of exact distributions for practically meaningful values of text parameters during an appropriate time on modern high-performance computer systems, even in case of cardinal upgrade of computer systems by means of advanced computing elements. Owing to narrowing of the class of the used statistics to the class of symmetrical additively-partitioned statistics, we have chosen the direction of improvement of the frequency method of exact distribution calculation. The aim is to restrain the enumerated sample space. Besides, we prove a principle possibility of application of the improved method in the areas of text parameters, where high computational complexity of the frequency method does not allow calculation of exact distributions. Based on the results of the estimation of maximum frequency statistic probability, we have improved the frequency method of exact distribution calculations. As a result, we have created a methodology of calculation of Δ -exact distributions, which differ from exact distributions no more than by the predetermined value Δ . A step-by-step description of the calculation methodology of Δ -exact distributions, which allows its practical application, is given. Besides, the results of the application of the methodology of the Δ -exact distribution calculation of text parameters are given. At present the calculation of exact distributions of these text parameters is impossible due to its high computational complexity.

Keywords: probability, statistics, criterion/test, exact distribution, limit distribution, computational complexity of method, performance of multiprocessor computer system

* Received 02 October 2017.

REFERENCES

1. Chepovskii A.M. *Informatsionnye modeli v zadachakh obrabotki tekstov na estestvennykh yazykakh* [Information models in tasks of processing of natural language texts]. Moscow, INTUIT Publ., 2015. 228 p.
2. Cramer H. *Mathematical methods of statistics*. Princeton, Princeton University Press, 1946 (Russ. ed.: Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki*. Moscow, Mir Publ., 1975. 648 p.).
3. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Vvedenie v matematicheskuyu statistiku* [Introduction to mathematical statistics]. Moscow, Lenard Publ., 2017. 608 p. ISBN 978-5-9710-4535-9.
4. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow, Librokom Publ., 2014. 352 p. ISBN 978-5-397-04141-6.
5. Zelyukin N.B., Mel'nikov A.K. [Slozhnost' rascheta tochnykh raspredeleniy veroyatnosti znacheniy statistik i oblast' primeneniya predelnykh raspredeleniy]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: materialy dokladov XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Electronic facilities and control systems: reports of the XIIIth International scientific and practical], 29th November – 1st December, 2017. Tomsk, 2017, pt. 2, pp. 84–90. (In Russian).
6. Mel'nikov A.K. Slozhnost' rascheta tochnykh raspredeleniy veroyatnosti simmetrichnykh additivno razdelyaemykh statistik i oblast' primeneniya predel'nykh raspredeleniy [Processing complexity in exacting probability distributions of symmetrical additively partitioned statistics and application area of limit distributions]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 126–130.
7. Helmer P.R. Uber die Wahrscheinlichkeit von Potenzsummen der Beobachtungsfehler und iiber einige damit im Zusammenhange stehende Fragen. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 1876, B. 21, pp. 102–219.
8. Neyman F., Pearson E.S. On the use and interpretation of certain test criteria for purposes of statistical inference. *Biometrika*, 1928, vol. 20-A, pp. 175–240, 264–299.
9. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables in such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5*, 1900, vol. 50, no. 302, pp. 157–170.
10. Smith P.F., Rae D.S., Manderscheid R.W., Silbergeld S. Exact and approximate distributions of the chi-squared statistic for equiprobability. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 1979, vol. 8 (2), pp. 131–149.
11. Korneev V.V. *Vychislitel'nye sistemy* [The computing system]. Moscow, Gelios ARV Publ., 2004. 512 p. ISBN 5-85438-117-6.
12. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A. Rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy na osnove PLIS [Reconfigurable computing system on FPGA]. *Intellekt & Tekhnologii – [Intelligence & Technology]*, 2014, no 1 (7), pp. 40–47.
13. Mel'nikov A.K. Issledovanie putei modernizatsii rekonfiguriruemykh vychislitel'nykh sistem [Research of possible modifications of reconfigurable computer systems]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2014, no. 12 (161), pp. 83–89.
14. Hall M. *Combinatorial theory*. Waltham, MA, Blaisdell Publ. Co., 1967 (Russ. ed.: Khol M. *Kombinatorika*. Moscow, Mir Publ., 1970. 424 p.).
15. Feller W. *An introduction to probability theory and its applications*. Vol. 1. New York, John Wiley & Sons, 1970 (Russ. ed.: Feller V. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostei i ee prilozheniya*. V 2 t. T. 1. Moscow, Mir Publ., 1984. 528 p.).
16. Melnikov A.K., Ronzhin A.F. Obobshchennyi statisticheskii metod analiza tekstov, osnovannyi na raschete raspredelenii veroyatnosti znachenii statistik [Generalized statistical method of text analysis based on calculation of probability distributions of statistical values]. *Informatika i ee primeneniya – Informatics and Applications*, 2016, vol. 10, iss. 4, pp. 89–95.

17. *Python programming language description*. Available at: <https://www.python.org/doc/> (accessed 22.03.2018).

18. Sachkov V.N. *Kombinatornye metody diskretnoi matematiki* [Combinatorial methods of discrete mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 320 p.

Для цитирования:

Мельников А.К. Методика расчета распределения вероятностей значений симметричных аддитивно разделяемых статистик, приближенных к их точному распределению // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 153–166. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-153-166.

For citation:

Melnikov A.K. Metodika rascheta raspredeleniya veroyatnostei znachenii simmetrichnykh additivno razdelyaemykh statistik priblizhennogo k ikh tochnomu raspredeleniyu [Processing complexity for exact probability distributions of symmetrical additively partitioned statistics and the application area of limit distributions]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 153–166. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-153-166.

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERIN
AND CONTROL

УДК 004.5

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-167-176

Моделирование автоматизированных технологических процессов в условиях информационных угроз*

Р.Р. ФАТКИЕВА

199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я линия, 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, кандидат технических наук, доцент. E-mail: rikki2@yandex.ru

В настоящее время усиливается внедрение различных информационных технологий в производственные процессы. Это приводит к увеличению рисков и возможным срывам этих процессов из-за нарушения их информационной безопасности. Известные методы обнаружения деструктивных воздействий на программное и информационное обеспечение не всегда применимы в цикле изготовления продукции вследствие особенностей функционирования автоматизированного оборудования, персонала, самих технологических процессов и временных привязок потока выпуска изделий. Цель исследования – поиск подходов, позволяющих оперативно оценивать риски нарушения информационной безопасности производственного процесса. Предложена математическая модель процесса обработки деталей в условиях информационных угроз. Модель позволяет получать количественные оценки вероятностей нарушения информационной безопасности, на основе которых можно обосновать мероприятия по обеспечению этой безопасности. На конкретных примерах показана эффективность разработанного метода. Практическая значимость: за счет своевременного проведения комплекса мероприятий по уменьшению влияния деструктивных воздействий на программное и информационное обеспечение производственных процессов можно существенно снизить вероятность срыва выпуска продукции и возможные потери.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическими процессами, информационная безопасность, системы обеспечения информационной безопасности, станки с числовым программным управлением

ВВЕДЕНИЕ

Одно из основных требований, выдвигаемых при внедрении информационных технологий в производственные процессы, является обеспечение их безопасности от случайных и злонамеренных воздействий. Если в предыдущем десятилетии распространенные угрозы были связаны с получением де-

* Статья получена 02 октября 2017 г.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИРФФИ №16-29-09482/17

нежной выгоды от реализации атаки, то в настоящее время увеличилось количество атак на промышленные объекты с целью шпионажа и с террористической направленностью.

Вектор атак с информационных систем перешел на производственные и промышленные сети. Например, статистика атак на промышленные сети в России за 2017 год выросла с 5 % до 15 % [1, 2].

Тем не менее сами технологические процессы из-за высокого уровня автоматизации стали более уязвимыми. Это обуславливает применение специальных развитых методов моделирования и прогнозирования угроз для оценки возможных рисков.

В настоящее время известны подходы к оценке рисков [3–11]. Однако не всегда возможности известных методов и моделей удовлетворяют потребностям практики по точности и оперативности, прогнозированию таких угроз и оценке рисков, они во многом не учитывают специфику реальных процессов. Для автоматизированных производств риски могут быть связаны с автоматизированным оборудованием, персоналом и самим технологическим процессом. Для таких производств понятие безопасности несколько отличается от традиционного. В статье рассмотрен подход, позволяющий оценить возможные риски, осуществить поиск уязвимостей и обосновать мероприятия по их устранению применительно к машиностроительному производству.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим постановку задачи на практическом примере технологического автоматизированного процесса обработки корончатой втулки. Процесс обработки состоит из последовательных операций (токарной, фрезерной и слесарной) на одношпиндельном оборудовании (рис. 1). В механосборочном цехе установлены станки, предполагающие автоматическую обработку детали по управляющей программе.



Рис. 1. Оборудование для обработки корончатой втулки

Требуется разработать подход, позволяющий оперативно оценивать риски от деструктивного воздействия.

Для оценки рисков и выработки мероприятий по противодействию необходимо в первую очередь определить операционные потоки, поскольку именно они являются наиболее доступным способом получения информации и несанкционированного воздействия. Для этого целесообразно представить схему функционирования предприятия, которая позволяет сформировать систему показателей деятельности. На основании этой схемы осуществляется мониторинг, прогнозирование и управление процессом производства.

Применение подобного подхода позволяет осуществлять следующие приемы анализа: сравнение полученных результатов текущего периода с ранее полученным; оценку реальных тенденций, происходящих в производственном цикле; выявление узких мест и проблем. В соответствии с существующей методологией оценки безопасности предприятия при формировании системы показателей эффективности в ее состав должны быть включены те из них, которые характеризуют назначение и доступность выполнения задачи за определенной период времени. В частности, информационная безопасность может характеризоваться через нарушения доступности, целостности и конфиденциальности информации. Однако применение данного подхода на практике может вызвать трудности, так как не всегда удается получить статистические данные по существующим нарушениям безопасности. В этом случае целесообразно использовать методы моделирования процесса производства для получения оценок нарушения работоспособности. В зависимости от иерархии представления производственного цикла в процессе нарушения безопасности могут возникнуть те или иные уязвимости. Соответственно, угрозы и показатели обеспечения безопасности на каждом из подуровней будут отличаться.

2. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННЫХ УГРОЗ

Для построения простейшей модели производственного процесса рассмотрим операционный поток обработки изделий (рис. 2).

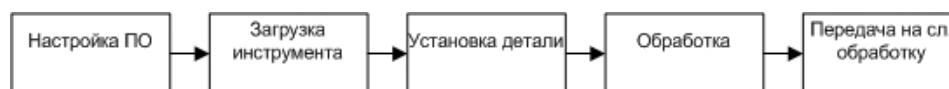


Рис. 2. Процесс механической обработки детали на станке с ЧПУ

Процесс обработки детали начинается с верификации установленного программного обеспечения (ПО) на станке с ЧПУ. Это необходимая операция, поскольку не все ошибки, содержащиеся в ПО, могут быть распознаны. Например, фреза может попасть не в ту координату, что приведет к нарушениям обработки детали. Затем осуществляется установка режущего инструмента в инструментальный магазин станка, при несоответствии которого может произойти поломка инструмента / станка или обрабатываемая деталь не будет соответствовать паспорту изделия. Неправильная установка обрабатываемой детали ведет к тому, что последовательность операций не может осуществиться в заданных координатах. Это может привести к одному или совокупности нарушений изготовления (испорченный инструмент / деталь / станок).

В этом случае процесс нарушения цикла обработки детали возможно представить в виде графа состояний (рис. 3), где S_1 – обработка детали в плановом режиме работы, S_2 – нарушение обработки из-за изменения структуры программного кода, S_3 – нарушение установки режущего инструмента, S_4 – нарушение установки обрабатываемой детали, S_5 – нарушение в механизмах обработки детали. Дуги графа соответствуют процессам перехода из одних состояний в другие.

Этот процесс (рис. 3) в ряде случаев можно рассматривать как марковский процесс, тогда дугам ставятся в соответствие значения интенсивности переходов $\lambda_{12}, \dots, \lambda_{51}$ из одного состояния в другое, а $P_1(t), \dots, P_5(t)$ являются вероятностями нахождения процесса в состояниях S_1, \dots, S_5 на момент времени t .

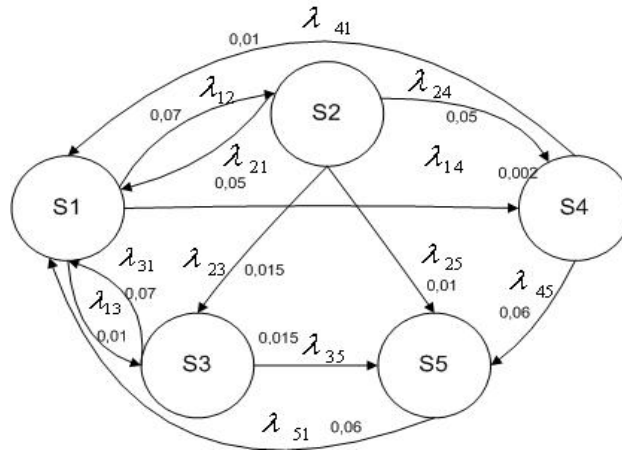


Рис. 3. Граф состояний операции при нарушении обработки детали

С учетом этого графу на рис. 3 можно поставить в соответствие систему из пяти дифференциальных уравнений [12]:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{31}P_3(t) + \lambda_{41}P_4(t) + \lambda_{51}P_5(t) - \\
 &- (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})P_1(t), \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{12}P_1(t) - (\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25})P_2(t), \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) - (\lambda_{31} + \lambda_{35})P_3(t), \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{14}P_1(t) - (\lambda_{41} + \lambda_{45})P_4(t), \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{25}P_2(t) + \lambda_{35}P_3(t) + \lambda_{45}P_4(t) - \lambda_{51}P_5(t).
 \end{aligned} \tag{1}$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки возможности перехода из одного состояния в другое необходимо знать значения параметров $\lambda_{12}, \dots, \lambda_{51}$. Их можно получить путем анализа производственного процесса или использования накопленной статистики [13, 14]. Зная $\lambda_{12}, \dots, \lambda_{51}$ и исходные состояния процесса, возможно прогнозировать вероятности нарушения обработки детали.

Пусть вероятности нахождения процесса в выделенных состояниях на момент времени $t=0$ определены как $\bar{P} = [P_1(0), P_2(0), P_3(0), P_4(0), P_5(0)] = [1, 0, 0, 0, 0]$, а интенсивности перехода заданы вектором $\bar{\lambda} = [\lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{21}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{31}, \lambda_{35}, \lambda_{41}, \lambda_{45}, \lambda_{51}]$ со значениями $\bar{\lambda} = [0.07, 0.01, 0.002, 0.05, 0.015, 0.05, 0.01, 0.07, 0.015, 0.01, 0.06]$.

Разрешая систему уравнений (1) при этих исходных данных с использованием пакета прикладных программ MathLab, получаем оценки вероятностей нахождения процесса в каждом из перечисленных состояний $\bar{P} = [0.35, 0.20, 0.08, 0.15, 0.22]$ на момент времени T . Анализ вектора \bar{P} показал, что с наибольшими вероятностями из всех деструктивных состояний проявляются состояния S_2 нарушения обработки из-за изменения структуры программного кода и состояния S_5 нарушения в механизмах обработки детали. В рамках этого подхода представляет интерес обоснование мероприятий по уменьшению вероятности нарушения обработки из-за изменения структуры программного кода. Для уменьшения влияния ошибок в структуре программного кода на производственный процесс рассмотрим комплекс мероприятий, заключающийся в предотвращении их появления. Он может включать [15]:

- проверку процесса функционирования станка в холостом режиме на малых оборотах;
- верификацию программного обеспечения на эталонной детали с последующей проверкой качества;
- применение режима, при котором все ускоренные перемещения выполняются над поверхностью заготовки с выводом оснастки на безопасном расстоянии после каждой операции.

В этом случае интенсивности переходов из состояния в состояние могут быть определены на основе собранных статистических данных в ходе производственного процесса. Применение данного подхода на практике показало изменение интенсивностей переходов из состояния S_1 в состояние S_2 и из состояния S_2 в состояние S_1 с уменьшением $\lambda_{12} = 0,03$ и увеличением $\lambda_{21} = 0,09$. Вероятность нахождения в состоянии S_2 уменьшается (кривая 2 на рис. 4, а) за счет увеличения интенсивности возврата в работоспособное состояние.

Для уменьшения вероятности перехода процесса из состояния S_1 в состояние S_3 было предусмотрено выполнение следующих мероприятий:

- инструктаж оператора станка по закреплению инструмента в стойке;
- использование динамометрического ключа для установки инструмента в оснастке;

– повторная верификация установленного в стойку инструмента измерительной техникой.

В этом случае интенсивности переходов из состояния S_1 в состояние S_3 и обратно изменились и стали равными $\lambda_{13} = 0,005$, $\lambda_{31} = 0,11$. Изменение поведения кривой на заданном временном интервале в этом случае также показывает уменьшение вероятности нахождения в состоянии S_3 (кривая 2 на рис. 4, б) за счет увеличения интенсивности возврата в работоспособное состояние, однако эффективность от данного вида мероприятий оказывается меньше по сравнению с первым комплексом мер.

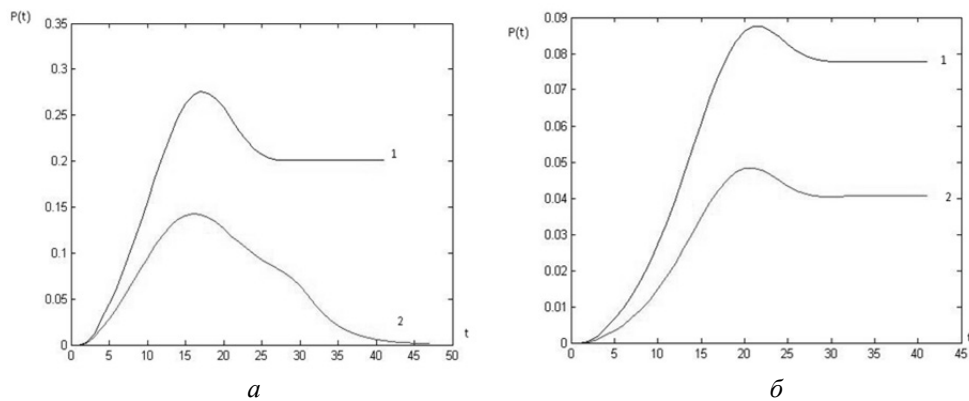


Рис. 4. Оценка вероятностей нахождения процесса в состоянии S_2 без осуществления комплекса мероприятий по ИБ (а) и при осуществлении комплекса мероприятий по ИБ (б)

Рассмотрим применение совокупности указанных ранее мероприятий и оценим вероятность нахождения процесса в состоянии S_1 с заданными ранее интенсивностями переходов (рис. 5).

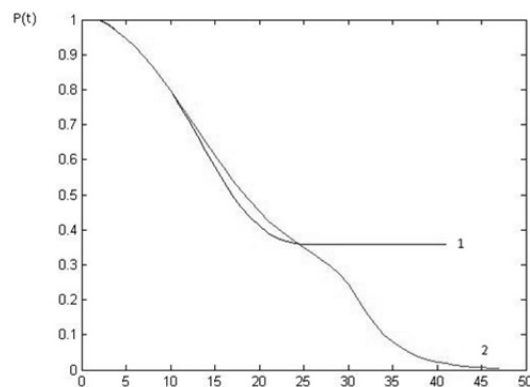


Рис. 5. Оценка вероятностей нахождения процесса в состоянии S_1 при осуществлении комплекса мероприятий

Важно отметить, что данный метод моделирует однородные и эргодические процессы, т. е. производственные процессы, установившиеся при заданных внешних условиях, что позволяет обнаружить аномальное поведение системы при сравнении реальных процессов с моделируемыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов проведенных исследований по моделированию автоматизированных технологических процессов в условиях информационных угроз показал следующее. Текущее состояние защиты этих процессов от существующих и перспективных информационных угроз не в полной мере удовлетворяет потребностям практики. Одной из причин такого состояния выступает несовершенство научно-методического аппарата обоснования мероприятий такой защиты. В интересах совершенствования защиты автоматизированных технологических процессов от информационных террористических угроз на примере конкретной задачи раскрыт подход к обоснованию возможных мероприятий защиты. Предложена новая модель процесса обработки деталей в условиях информационных террористических угроз (нарушения и сбои в программном коде). По аналогии с этой моделью могут быть разработаны другие модели, свойственные различным автоматизированным технологическим процессам. Полученные результаты моделирования позволяют определять наиболее уязвимые элементы в анализируемых процессах и находить целесообразные мероприятия по защите. Полученные решения применимы на производстве при планировании мероприятий защиты критически важных технологических процессов от возможных угроз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные киберугрозы. II квартал 2017 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Cybersecurity-2017-rus.pdf> (дата обращения: 22.03.2018).
2. Угрозы безопасности промышленных предприятий и IoT: прогноз на 2018 год [Электронный ресурс]. – URL: https://ics-cert.kaspersky.ru/media/KL_ICS_CERT_Predictions2018_ICS_IoT_RUS_30112017.pdf (дата обращения: 22.03.2018).
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1–2012. Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Ч. 1. Введение и общая модель. – Введ. 2013-12-01. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 56 с.
4. Осипов В.Ю., Носаль И.А. Обоснование мероприятий информационной безопасности // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 2 (63). – С. 48–53.
5. Осипов В.Ю., Носаль И.А. Обоснование периода пересмотра мероприятий по защите информации // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 1 (68). – С. 63–68.
6. Лившиц И.И. Формирование концепции мгновенных аудитов информационной безопасности // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 6 (43). – С. 253–270. – doi: 10.15622/sp.43.14.
7. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 162–174.
8. Мухомад Ю.Ф., Мухомад А.Ю., Пунсык-Намжилов Д.Ц. Контроль управляющих автоматов сложных технических систем реального времени // Научный вестник НГТУ. – 2017. – № 1 (66). – С. 53–62. – doi: 10.17212/1814-1196-2017-1-53-62.

9. Давиденко О.Н., Баданин Д.Н., Кобзев Д.А. Методика оценки угроз информационной безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4 (24). – С. 84–91.

10. Мусаев А.А., Нозик А.А., Русинов Л.А. Прогностический анализ безопасности промышленного предприятия // Известия СПбГТИ. – 2016. – № 34 (60). – С. 87–93. – doi: 10.15217/issn1998984-9.2016.34.87.

11. Юсупов Р.М., Мусаев А.А. Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 51. – С. 5–34. – doi: 10.15622/sp.51.1.

12. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Academia, 2003. – 464 с.

13. Пучков В.П., Якунин В.В. Исследование надежности станков с ЧПУ ТПК-125 в реальных условиях эксплуатации // Приволжский научный вестник. – 2013. – № 12-2 (28). – С. 51–55.

14. Новиков И.С. Методы расчета количественных показателей надежности сложных программных комплексов на стадии проектирования и разработки // Труды СПИИРАН. – 2008. – Вып. 6. – С. 86–111. – doi: 10.15622/sp.6.8.

15. Введение в программирование обработки [Электронный ресурс]. – URL: <http://planetacam.ru/college/learn/3-5/> (дата обращения: 22.03.2018).

Фаткиева Роза Равильевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий программирования Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Основное направление научных исследований – информационная безопасность. Имеет более 40 публикаций. E-mail: rikki2@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-167-176

Modeling of automated technological processes under conditions of information threats*

R.R. FATKIEVA

Federal State Institution of Science St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 39, K. 14-th Linia, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, Ph.D. (Eng.), senior researcher. E-mail: rikki2@yandex.ru

Nowadays there is a common trend of incorporating information technologies into production processes. This leads to increasing risks and possible disruptions of these processes due to violations of their information security. The existing methods of detecting destructive impacts on software are not always applicable within the production cycle because of particular qualities of equipment functioning, staff, technological processes and timing conditions of the product release stream. The purpose of the research is to find approaches that make possible rapid assessment of information security violation risks in the production process. A mathematical model of processing parts under conditions of information threats is proposed. The model allows assessing the probabilities of information security violations. On the basis of these probabilities it is possible to determine measures to ensure security. The efficiency of the proposed method is shown on specific examples. Practical significance lies in the fact that due to timely taken measures to reduce the influence of destructive impacts on the production software the probability of disruption in the production process and possible losses can be significantly reduced.

* Received 02 October 2017.

Keywords: automated control system of technological processes, information security, information security systems, machine tools with numerical control

REFERENCES

1. *Aktual'nye kiberugrozy. II kvartal 2017* [Relevant cyberthreats the II quarter 2017]. Available at: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Cybersecurity-2017-rus.pdf> (accessed 22.03.2018).
2. *Ugrozy bezopasnosti promyshlennykh predpriyatii i IoT: prognoz na 2018 god* [Threats to security of the industrial enterprises and IoT: the forecast for 2018]. Available at: https://ics-cert.kaspersky.ru/media/KL_ICS_CERT_Predictions2018_ICS_IoT_RUS_30112017.pdf (accessed 22.03.2018).
3. GOST R ISO/MEK 15408-1–2012. *Informatsionnaya tekhnologiya (IT). Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologii. Ch. 1. Vvedenie i obshchaya model'* [State Standard 15408-1–2012. Information technology. Security techniques. Evaluation criteria for IT security. Pt. 1. Introduction and general model]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 56 p.
4. Osipov V.Yu., Nosal' I.A. Obosnovanie meropriyatii informatsionnoi bezopasnosti [Substantiation of information security measures]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy – Information and Control Systems*, 2013, no. 2 (63), pp. 48–53.
5. Osipov V.Yu., Nosal' I.A. Obosnovanie perioda peresmotra meropriyatii po zashchite informatsii [Substantiation of the period of revision of information security measures]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy – Information and Control Systems*, 2014, no. 1 (68), pp. 63–68.
6. Livshits I.I. Formirovanie kontseptsii mgnovennykh auditov informatsionnoi bezopasnosti [Formation of the instantaneous information security audit concept]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2015, iss. 6 (43), pp. 253–270. doi: 10.15622/sp.43.14.
7. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy kontseptsii proaktivnogo monitoringa i upravleniya slozhnymi ob"ektami [Conception of complex objects proactive monitoring management and control: theoretical and technological foundations]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2015, no. 1, pp. 162–174.
8. Mukhopad Yu.F., Mukhopad A.Yu., Punsyk-Namzhilov D.Ts. Kontrol' upravlyayushchikh avtomatov slozhnykh tekhnicheskikh sistem real'nogo vremeni [Control automata of complex engineering real time systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (66), pp. 53–62. doi: 10.17212/1814-1196-2017-1-53-62.
9. Davidenko O.N., Badanin D.N., Kobzev D.A. Metodika otsenki ugroz informatsionnoi bezopasnosti avtomatizirovannykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami (ASUTP) [Assessment method for information security threats in industrial control systems (ICS)]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov – Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2016, no. 4 (24), pp. 84–91.
10. Musaev A.A., Nozik A.A., Rusinov L.A. Prognosticheskii analiz bezopasnosti promyshlennogo predpriyatiya [Predictive analysis of safety of an industrial enterprise]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta – Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology*, 2016, no. 34 (60), pp. 87–93. doi: 10.15217/issn1998984-9.2016.34.87.
11. Yusupov R.M., Musaev A.A. Osobennosti otsenivaniya effektivnosti informatsionnykh sistem i tekhnologii [Efficiency of information systems and technologies: features of estimation]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2017, iss. 2 (51), pp. 5–34. doi: 10.15622/sp.51.1.
12. Ventsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostei i ee inzhenernye prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. Moscow, Academia Publ., 2003. 464 p.
13. Puchkov V.P., Yakunin V.V. Issledovanie nadezhnosti stankov s ChPU TPK-125 v real'nykh usloviyakh ekspluatatsii [Reliability examination of CNC turning chuck-type machine TPK-125 under actual operating conditions]. *Privolzhskii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 12-2 (28), pp. 51–55.

14. Novikov I.S. Metody rascheta kolichestvennykh pokazatelei nadezhnosti slozhnykh programmnykh kompleksov na stadii proektirovaniya i razrabotki [Metody rascheta kolichestvennykh pokazatelei nadezhnosti slozhnykh programmnykh kompleksov na stadii proektirovaniya i razrabotki]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2008, iss. 6, pp. 86–111. doi: 10.15622/sp.6.8.

15. *Vvedenie v programmirovaniye obrabotki* [Introduction to processing programming]. Available at: <http://planetacam.ru/college/learn/3-5/> (accessed 22.03.2018).

Для цитирования:

Фаткеева P.P. Моделирование автоматизированных технологических процессов в условиях информационных угроз // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 167–176. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-167-176.

For citation:

Fatkieva R.R. Modelirovaniye avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh protsessov v usloviyakh informatsionnykh ugroz [Modeling automated technological processes under conditions of information threats]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 167–176. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-167-176.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО–
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,
METROLOGY
AND INFORMATION–
MEASUREMENT
DEVICES AND SYSTEMS

УДК 62-52, 621.317.785

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188

Технологический контроль метрологических характеристик счетчиков электроэнергии на производстве*

Ю.А. ПАСЫНКОВ¹, М.А. САВИНЫХ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, Немировича-Данченко, 136, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: pasinkovnstu@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, Немировича-Данченко, 136, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: bigmax.sav@gmail.com

Современные приборы учета электроэнергии имеют множество разнообразных функций, таких как регистрация и хранение различных параметров сети, коммутация нагрузки, передача данных по интерфейсам. Но главной функцией остается измерение электроэнергии. Поэтому самой важной и ответственной операцией при производстве является контроль метрологических характеристик счетчиков. В статье описаны два основных метода определения погрешностей счетчиков: метод сличения с эталонным счетчиком и метод задаваемой стабилизированной мощности, а также проведен их сравнительный анализ. Выявлено, что для проведения технологического контроля на предприятии при массовом производстве более удобным является метод задаваемой стабилизированной мощности. При его использовании имеется возможность контроля ряда метрологических характеристик без введения дополнительных единиц измерительного оборудования. Например, контроль погрешности измерения тока, напряжения и частоты, контроль самохода и порога чувствительности. В соответствии с данным методом для проведения технологического контроля на производстве был разработан автоматизированный стенд с использованием измерительного генератора КФМ-06. При этом погрешность проверяемого счетчика определяется по периоду сигнала с его испытательного выхода, который измеряется с помощью встроенного в генератор модуля измерения периода. В статье описаны функциональная схема стенда и принцип его работы. Показаны преимущества использования данного стенда перед устаревшими стендами, работающими по методу сличения с эталонным счетчиком, среди них контроль большего количества электрических параметров, автоматизация процесса и, как следствие, уменьшение числа ошибок контроля, связанных с человеческим фактором, повышение производительности в целом.

* Статья получена 08 августа 2017 г.

Ключевые слова: счетчик электроэнергии, метрологические характеристики, технологический контроль, погрешность, генератор фиктивной мощности, измерение периода, автоматизированный стенд, LabVIEW, производительность

ВВЕДЕНИЕ

Современные приборы учета электроэнергии (счетчики) – это сложные многофункциональные устройства. Помимо измерения основного параметра – электроэнергии – они позволяют измерять множество дополнительных, таких как ток, напряжение, частота, активная и реактивная мощность, сдвиг фаз и др. Также они имеют ряд дополнительных функций. Например, коммутация нагрузки (отключение потребителя от сети), передача данных по различным интерфейсам (RS-232, RS-485, передача по силовой сети, радиоканал и другие), в том числе по открытому стандартному протоколу IEC 62056 (DLMS/COSEM) [1], регистрация и сохранение в памяти событий включения и отключения счетчика, выхода значений напряжения тока, напряжения и мощности за установленные пороги и др. Все функции необходимо контролировать в процессе производства, чтобы своевременно выявлять и устранять брак. Несмотря на все многообразие функций электросчетчика, самой главной остается измерение электроэнергии с высокой точностью. Согласно [2] счетчики граждан (физических лиц) должны иметь класс точности 2.0 и выше, счетчики на вводах многоквартирных домов – 1.0 и выше, мощные потребители (организации, предприятия) – 1.0 или 0.5S и выше в зависимости от мощности и напряжения. Отсюда видно, что индукционные счетчики производства конца XX века с классом точности 2.5 в настоящее время использовать нельзя, и их необходимо заменять. Выпускаемые новые счетчики электроэнергии, как отмечено выше, должны иметь класс точности 2.0, 1.0, 0.5S. Большинство выпускаемых современных приборов учета электроэнергии имеют класс точности 1.0 (счетчики «РиМ» (например, РиМ181, РиМ189, РиМ489) [3]; счетчики «Энергомера» (например, СЕ101, СЕ200, СЕ102, ЦЭ6803) [4]; счетчики «Меркурий» (например, «Меркурий 234», «Меркурий 236», «Меркурий 230») [5]). Но некоторые модели счетчиков перечисленных производителей имеют классы точности 2.0 и 0.5S.

Поскольку измерение электрических параметров сети является главной функцией счетчика, то контроль метрологических характеристик (относительных погрешностей измерения в соответствии с [6]) является одним из самых важных и ответственных этапов при производстве, а требования к используемому в процессе контроля оборудованию очень высокие. В статье описаны основные методики контроля метрологических характеристик приборов учета электроэнергии, а также устройство и принцип работы разработанного стенда для автоматизированного проведения данной операции.

1. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Контроль метрологических характеристик приборов учета электроэнергии является одним из этапов поверки, которая производится для готовых приборов перед выпуском с предприятия, согласно Федеральному закону

«Об обеспечении единства средства измерений» [7]. Этапы и условия поверки регламентирует ГОСТ [8]. Кроме того, аналогичная операция проводится в процессе производства и называется «технологический контроль». Требования к оборудованию при этом аналогичны требованиям к поверочной установке, описанным в работе [8], согласно которым поверочная установка должна содержать источник фиктивной мощности, эталонные средства измерений, стенд для установки и подключения поверяемых счетчиков к источнику фиктивной мощности и эталонным средствам измерений, устройство обработки результатов измерений – вычислитель погрешности. Источник фиктивной мощности представляет собой синхронные, но независимые источники тока и напряжения. Существует два подхода к определению погрешностей счетчика: метод сличения с эталонным счетчиком и метод задаваемой стабилизированной мощности [8].

Метод сличения с эталонным счетчиком. Поверочная установка в этом случае должна содержать источник фиктивной мощности, эталонный счетчик электрической энергии, эталонные масштабные преобразователи тока и напряжения (например, эталонные трансформаторы тока и напряжения). Ток и напряжение при этом задаются генератором приближенно. Они подаются на образцовый счетчик и на поверяемый, которые соединены параллельно по напряжению и последовательно по току. В качестве показаний счетчиков используют приращение показаний счетного механизма или число импульсов, поступивших от одного из испытательных выходов. Тогда погрешность поверяемого счетчика может быть определена по формуле [8]

$$\gamma_{\text{сч}} = \frac{(C_{\text{с}}N_{\text{с}} - C_{\text{эт}}N_{\text{эт}})}{C_{\text{эт}}N_{\text{эт}}}. \quad (1)$$

Здесь $C_{\text{с}}$ – постоянная поверяемого счетчика; $C_{\text{эт}}$ – постоянная эталонного счетчика. Постоянная счетчика зависит от конкретного типа счетчика и определяет приращение измеренной энергии на один импульс испытательного выхода, Вт · ч/имп; $N_{\text{с}}$, $N_{\text{эт}}$ – число импульсов с испытательного выхода поверяемого и эталонного счетчиков соответственно (за время измерения).

Недостатком вычисления погрешности счетчика по формуле (1) является значительная методическая погрешность дискретности, связанной с квантованием непрерывного времени дискретными импульсами [9]. Она возникает из-за того, что импульсы с поверяемого и эталонного счетчиков не синхронизированы между собой. Из-за этого в интервал времени измерения попадет не целое число периодов импульсов, и в предельном случае это дает погрешность в 1 импульс, или $C_{\text{с}}$ Вт · ч для поверяемого счетчика и $C_{\text{эт}}$ Вт · ч для эталонного счетчика. Эта погрешность является дополнительной и делает неточным определение собственной погрешности счетчика. Ее относительное значение равно $\frac{C_{\text{с}} \cdot 1}{C_{\text{с}}N_{\text{с}}} = \frac{1}{N_{\text{с}}}$ для поверяемого счетчика и $\frac{1}{N_{\text{эт}}}$ – для эталонного.

Обычно на практике частота импульсов с одного из счетчиков намного меньше, чем со второго. Поэтому интервал времени, в течение которого подсчитываются импульсы, синхронизируют с сигналом испытательного выхода того из счетчиков, частота которого меньше. Тогда для этого счетчика по-

грешность дискретности будет равна нулю, но для второго счетчика она останется прежней. Для уменьшения данной погрешности необходимо увеличивать количество импульсов с этого счетчика, а значит, увеличивать время измерения. В результате данный метод оказывается неудобным при массовом производстве счетчиков, где время операции играет значительную роль.

Однако этого можно избежать, если вместо подсчета количества импульсов измерять их период. Тогда относительную погрешность счетчика можно определить по формуле

$$\gamma_{\text{сч}} = \frac{(C_{\text{с}} / T_{\text{с}} - C_{\text{эт}} / T_{\text{эт}})}{C_{\text{эт}} / T_{\text{эт}}}, \quad (2)$$

здесь $T_{\text{с}}$, $T_{\text{эт}}$ – периоды импульсов поверяемого и эталонного счетчиков соответственно.

Тем не менее общим недостатком такого метода является сложность установки выходных сигналов генератора (ток, напряжение, фаза) в точно заданные значения, если это требуется при проведении выходного контроля (так как генератор не является образцовым и позволяет установить требуемые значения выходных сигналов приближенно). Также в данном методе требуется использование минимум двух единиц метрологического оборудования – генератора и образцового счетчика.

Метод задаваемой стабилизированной мощности. Для данного метода поверочная установка должна содержать эталонный ваттметр, амперметры и вольтметры, эталонные масштабные преобразователи тока и напряжения (например, эталонные трансформаторы тока и напряжения). Эталонные ваттметр, амперметр и вольтметр обычно входят в состав генератора, что позволяет точно задавать требуемый режим и поддерживать его стабильным. В качестве показаний поверяемого счетчика принимают длительность периодов или частоту следования импульсов одного из испытательных выходов. Для бытовых счетчиков электроэнергии постоянная счетчика составляет в среднем 1/5000...1/3000 кВт·ч/имп (например, 1/4000 для РИМ189, РИМ489 [3]; 1/3200 – для СЕ 102, ЦЭ6803В [4]; 1/5000 – для «Меркурий 201», «Меркурий 234» [5]), хотя бывают модели и с другими значениями постоянной счетчика. Это означает, что если на счетчик подается мощность 1 кВт (приблизительно такая мощность и подается на счетчик при проведении контроля метрологических характеристик), то за час с испытательного выхода придет 3000...5000 импульсов, т. е. порядка одного импульса в секунду. Это означает, что частота импульсов для таких счетчиков – это достаточно маленькая величина (единицы, а в некоторых испытательных режимах и доли герц). Поэтому на практике удобнее измерять период, а не частоту импульсов. При стабильной поданной мощности период импульсов с испытательного выхода также стабилен. Это достигается за счет того, что в микроконтроллере счетчика генерация импульсов происходит независимо от измерения мощности. То есть в одном функциональном блоке вычисляется средняя за несколько периодов входного измеряемого сигнала мощность, а затем в другом функциональном блоке генерируются импульсы с постоянным периодом, пропорциональным измеренной мощности. Поэтому в процессе технологиче-

ского контроля метрологических характеристик можно измерять только один период импульсов с испытательного выхода, так как заданная мощность стабильна. Однако для уменьшения случайных погрешностей (которые, например, могут быть вызваны шумами, накладываемыми на сигнал с испытательного выхода) обычно измеряют среднее значение периода за время, равное нескольким периодам импульсов. Тогда погрешность поверяемого счетчика определяется по формуле

$$\gamma_{\text{сч}} = \frac{(C_{\text{с}} / T_{\text{с}} - P_{\text{эт}})}{P_{\text{эт}}}. \quad (3)$$

Здесь $T_{\text{с}}$ – средний за время измерения период импульсов с испытательного выхода поверяемого счетчика; $P_{\text{эт}}$ – мощность, задаваемая генератором (постоянная в течение времени измерения). Эта мощность берется непосредственно из установок генератора, так как генератор задает ее точно в соответствии с установками и в пределах своего класса точности. Мощность, измеренная счетчиком, может определяться по периоду сигнала телеметрии или иным способом. Например, путем чтения значений измерений мощности по интерфейсу, тогда вместо $C_{\text{с}} / T_{\text{с}}$ в формуле (3) будет значение мощности, полученное непосредственно со счетчика $P_{\text{сч}}$. Преимуществом данного метода перед методом образцового счетчика является возможность точного задания точки контроля (ток, напряжение, фаза), а также только одна единица метрологического оборудования, необходимая для проведения контроля электрических параметров, – сам образцовый генератор. Кроме этого, если в поверяемом счетчике имеется возможность получения данных об измеренных значениях тока, напряжения и разности фаз (по интерфейсу), то определение погрешности измерения данных величин также возможно, так как заданные генератором ток, напряжение и разность фаз известны (из установок генератора или из показаний эталонных приборов, имеющих в составе стенда).

Метод задаваемой стабилизированной мощности является более удобным для технологического контроля метрологических характеристик счетчиков в процессе производства, так как является более гибким с точки зрения возможности контроля множества различных параметров счетчиков (а не только погрешности по мощности), а также требует меньшего количества оборудования. Поэтому для замены имеющихся на производственном предприятии стендов, работающих на основе метода сличения с эталонным счетчиком и имеющих ряд ограничений в работе, был разработан автоматизированный стенд для технологического контроля метрологических характеристик однофазных счетчиков электроэнергии с использованием прецизионного генератора (калибратора) фиктивной мощности. Основные технические и метрологические требования, предъявляемые к калибратору: класс точности на ниже 0.1, диапазон напряжений до 270 В, диапазон токов до 100 А, нагрузочная способность в канале напряжения не менее 100 мА, так как сами подключаемые счетчики потребляют некоторую мощность для своей работы. Также необходима возможность управления калибратором программно с компьютера. На современном рынке существует несколько типов подобных приборов: калибраторы фирм Calmet (например, С200В, С300, СР11 [10]),

Fluke (например, 6105A, 6100B [11]), Meantest (например, Calibro 144 [12]), НПП «Марс-Энерго» (например, УППУ-МЭ 3.1 КМ-С [13]), ООО «Эника» (КФМ-06 [14]). Всем перечисленным требованиям, а также приемлемому уровню цены (до 1 млн рублей) отвечают калибраторы КФМ-06 и УППУ-МЭ 3.1КМ-С. Из них в конечном счете выбран калибратор КФМ-06, так как он более надежен при частом переключении режимов (значений тока, напряжения и сдвига фаз), что актуально при технологическом контроле большого количества производимых счетчиков.

2. КОНТРОЛЬ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТОРА ФИКТИВНОЙ МОЩНОСТИ КФМ-06

Калибратор фиктивной мощности КФМ-06 [14] представляет собой электронное устройство, содержащее независимые синхронные генераторы тока и напряжения (однофазные либо трехфазные, в зависимости от исполнения), а также 10-канальный блок измерения периода сигналов с испытательных выходов поверяемых счетчиков. Управляется генератор с персонального компьютера по интерфейсу USB 2.0. Для этого в программе на компьютере численно задается требуемый режим (напряжение, ток, сдвиг фазы, частота), и генератор устанавливает его и поддерживает неизменным с погрешностью, определяемой его классом точности. Класс точности генераторов КФМ-06 бывает 0.1 и 0.05, поэтому они подходят для контроля счетчиков класса 1 и 0.5, которые преимущественно производятся в настоящее время.

Данный генератор позволяет реализовать контроль метрологических характеристик счетчика электроэнергии по методу задаваемой стабилизированной мощности. Поэтому задаваемая мощность не измеряется явно, и ее погрешность мала и заранее известна (класс точности генератора). Мощность, измеренная проверяемым счетчиком, определяется по периоду сигнала с измерительного выхода. Благодаря этим двум факторам при использовании КФМ-06 отсутствует методическая погрешность дискретности, которая имела бы место при подсчете числа импульсов телеметрического выхода за заданный интервал времени и определении погрешности счетчика по формуле (1). Строго говоря, погрешность дискретности присутствует при измерении периода импульсов испытательного выхода поверяемого счетчика. Для измерения периода этот сигнал заполняется высокочастотным импульсным сигналом встроенного в КФМ-06 прецизионного стабилизированного кварцем генератора, и подсчитывается количество этих импульсов за время одного периода сигнала испытательного выхода счетчика. Поскольку в один период сигнала испытательного выхода в общем случае укладывается не целое число импульсов высокочастотного заполняющего сигнала, то может возникнуть погрешность дискретности в один импульс. Однако частота заполняющего сигнала составляет несколько мегагерц, что на несколько порядков больше частоты сигнала с испытательного выхода счетчика, поэтому эта погрешность дискретности мала и составляет порядка $10^{-7} \dots 10^{-6}$. С учетом погрешности настройки ($dF / F = (30 \dots 50) \cdot 10^{-6}$) и температурного дрейфа

($K_T = (30...50) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) кварцевого резонатора итоговая погрешность измерения периода сигнала с испытательного выхода счетчика будет составлять $(1...2) \cdot 10^{-4}$. На практике этого достаточно для определения погрешности счетчиков класса точности 1 и 0.5S.

Таким образом, в процессе проверки параметры задаваемых сигналов – напряжение, ток, сдвиг фазы, частота, активная и реактивная мощность – известны и принимаются за эталон при определении погрешностей счетчика. Поскольку многие современные счетчики имеют интерфейсы передачи данных, то измерения счетчика в заданном режиме – напряжение, ток, сдвиг фазы, частота, активная и реактивная мощность – можно прочитать по интерфейсу. Сравнение считанных данных с заданными определяет погрешность счетчика по данным параметрам. Кроме этого, активную и реактивную мощность, измеренную счетчиком, можно определить по периоду сигналов его испытательных выходов. Чаще всего это требуется, так как необходимо контролировать функционирование самих испытательных выходов. Эти сигналы подаются на блок измерения периодов, который имеется в составе генератора КФМ-06, где измеряется и по среднему значению периодов определяется мощность по показаниям счетчика.

Помимо контроля погрешности измерения указанных выше метрологических характеристик, на этапе технологического контроля проверяется ряд дополнительных параметров.

1. Отсутствие самохода. Для данной проверки на счетчик подается максимальное рабочее напряжение и нулевой ток. По интерфейсу считываются измерения активной и реактивной мощности счетчика и проверяется, что они равны нулю.

2. Проверка чувствительности. На счетчик подаются номинальное напряжение и минимальный ток, при котором счетчик должен регистрировать мощность. По интерфейсу считывается измеренная мощность и контролируется, что она не равна нулю. Погрешность измерения на данном этапе не контролируется, так как она не нормирована на малых токах, близких к порогу чувствительности.

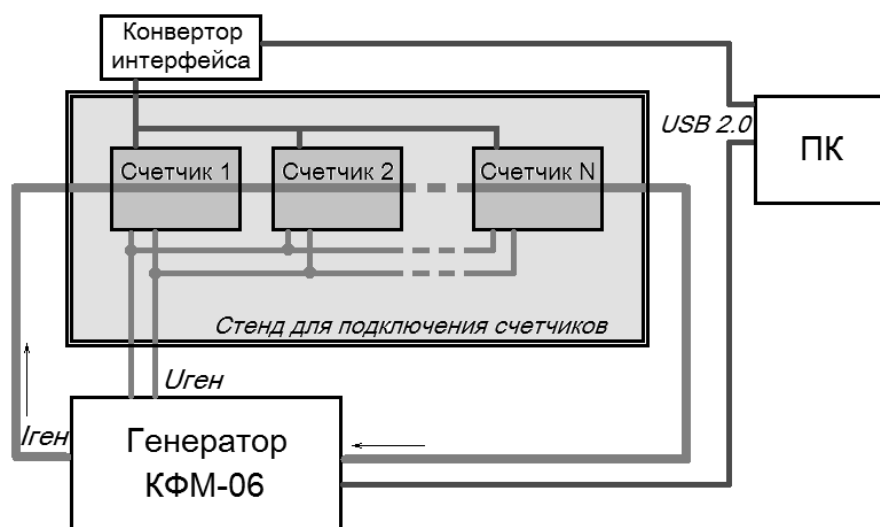
3. Проверка функции размыкания. В некоторых модификациях счетчиков в токовой цепи имеется реле, которое позволяет отключить потребителя от сети. Оно управляется командой по интерфейсу. Эту функцию целесообразно проверять на этапе технологического контроля вместе с метрологическими характеристиками. Для этого на счетчик по интерфейсу посылаются команды на замыкание и размыкание реле и контролируется его переключение.

3. СТЕНД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОФАЗНЫХ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Разработанный автоматизированный стенд для технологического контроля метрологических характеристик состоит из четырех основных блоков (см. рисунок): генератор фиктивной мощности КФМ-06, стенд для подключения счетчиков электроэнергии, персональный компьютер (ПК), конвертор

интерфейса. Интерфейсы для связи счетчиков не являются стандартными, поэтому их нельзя подключить к ПК напрямую. Для этого используются преобразователи интерфейса счетчика в стандартный USB 2.0 (например, USB-RF, USB-RS485 и другие – в зависимости от типа счетчика).

Поскольку используемый генератор позволяет выдавать ток и напряжения во всем диапазоне требуемых значений, масштабные преобразователи тока и напряжения (трансформаторы) не используются. Напряжение в стенде задается номинальным (230 В) либо максимальным для контроля самохода (264 В), ток в общем случае задается в пределах от 0 до 100 А, но для некоторых моделей счетчиков максимальный ток меньше 100 А.



Функциональная схема стенда для технологического контроля электрических параметров однофазных счетчиков электроэнергии

Логику всей проверки задает программа на ПК, написанная в среде LabVIEW. Данная программная среда специально предназначена для тестирования, измерения и управления с быстрым доступом к аппаратному обеспечению и внутренней информации [15]. Разработанная программа выдает команды на генератор КФМ для установки требуемого режима, получает с него данные об измеренной счетчиками мощности (которую генератор определяет по периоду сигналов с испытательных выходов счетчиков), запрашивает у счетчиков (по интерфейсу) измерения различных параметров (ток, напряжение, мощность и другие), выполняет вычисление погрешностей счетчиков, определяет их годность (соответствие погрешностей заданным допустимым диапазонам), сохраняет результаты в базу данных.

Режимы проверки могут меняться в процессе производства: добавляться или убираться по решению технолога. Поэтому все режимы для каждого типа счетчика хранятся в базе данных и могут быть скорректированы. Программа для управления стендом технологического контроля считывает из базы данных требуемые режимы и по очереди их выполняет. Вместе с требуемыми режимами из базы данных считывается также предел допустимой погрешности для каждого режима, который может корректироваться технологом.

В процессе проверки отслеживается состояние генератора, и в случае его перегрева или перегрузки (что возможно, например, при коротком замыкании в цепи напряжения счетчика или обрыве в цепи тока) режим генератора сбрасывается и поверка счетчиков прекращается. Кроме этого, поверка прекращается в случае, когда нет связи по интерфейсу для всех испытываемых счетчиков, так как эта ситуация соответствует неисправности конвертора. Если же связь отсутствует только у части счетчиков, то это свидетельствует о неисправности этих счетчиков, и поверка остальных установленных счетчиков продолжается.

Таким образом, разработанное рабочее место для технологического контроля электрических параметров счетчиков электроэнергии практически полностью автоматизировано. Оператору необходимо установить поверяемые счетчики на стенд и запустить программу поверки на ПК. Все остальное выполняется автоматически. Благодаря этому исключаются ошибки при поверке счетчиков, связанные с человеческим фактором, а также сокращается время поверки по сравнению с аналогичными стендами, работающих по методу сличения с эталонным счетчиком. В этих устаревших стендах оператору необходимо вручную устанавливать и регулировать задаваемый режим, читать вычисленную погрешность с дисплея вычислителя и заносить ее в базу данных. Время поверки на новом разработанном стенде составляет несколько минут и не зависит от количества установленных на стенд поверяемых счетчиков (максимум 5 счетчиков). Это время определяется только количеством режимов поверки и поэтому может варьироваться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведено сравнение двух подходов к контролю метрологических характеристик счетчиков электроэнергии: метода сличения с эталонным счетчиком и метода задаваемой стабилизированной мощности. Показано, что для технологического контроля при массовом производстве счетчиков метод задаваемой стабилизированной мощности является более подходящим.

Разработанный автоматизированный стенд для технологического контроля метрологических характеристик однофазных счетчиков электроэнергии заменил на производственном предприятии устаревшие аналогичные стенды, в которых многие операции выполняются вручную. В отличие от старых стендов, выполняющих контроль по методу сличения с эталонным счетчиком, разработанный стенд работает по методу задаваемой стабилизированной мощности. Благодаря этому он позволяет проверять большее количество параметров, причем в автоматическом режиме. В результате операция контроля метрологических характеристик счетчиков в процессе производства стала более эффективной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мамаев А.* DLMS/COSEM – открытый протокол для обмена данными с приборами учета. Ч. 1: краткий обзор [Электронный ресурс]. – URL: <https://habrahabr.ru/post/302246/> (дата обращения: 22.03.2018).
2. Постановление Правительства РФ от 4 мая 2012 г. № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии».
3. Счетчики электрической энергии производства АО «РиМ» [Электронный ресурс]. – URL: www.zao-rim.ru/cat_cntrs (дата обращения 22.03.2018).
4. Счетчики электрической энергии производства АО «Электротехнические заводы «Энергомера». [Электронный ресурс]. URL: www.energomera.ru/ru/products/meters (дата обращения: 22.03.2018).
5. Счетчики электрической энергии производства ООО «НПК «Инкотекс» [Электронный ресурс]. – URL: www.incotexcom.ru/counters.htm (дата обращения: 22.03.2018).
6. ГОСТ 8.401–80. Классы точности средств измерений. Общие требования. – Взамен ГОСТ 13600–68; введ. 1981–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1981.
7. Федеральный закон от 26.06.2008 N 102-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «Об обеспечении единства измерений».
8. ГОСТ 8.584–2004. Счетчики статической активной электрической энергии переменного тока. Методика поверки. – Введ. 2005–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2004.
9. ГОСТ 13607–68. Приборы и преобразователи электроизмерительные цифровые. Основные термины и определения. – Введ. 1969–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1994.
10. Calmet. Power calibrators and power quality calibrators [Electronic resource]. – URL: www.calmet.com.pl/eng/pages/detail.php?product=pwr (accessed: 22.03.2018).
11. Fluke. Calibration. 6105A, 6100B Electrical Power Quality Calibrator [Electronic resource]. – URL: <https://us.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a-6100b-electrical-power-quality-calibrat> (accessed: 22.03.2018).
12. Meantest. Оборудование для точных измерений и калибровки. Калибраторы мощности/энергии Calibro 133C/133Ci [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.meantest.ru/index.php/production/kalibratory-moshchnosti-energii/84-kalibratory-moshchnosti-energii-calibro-133c-133ci> (дата обращения: 22.03.2018).
13. Установка поверочная универсальная «УППУ-МЭ 3.1КМ-С». Руководство по эксплуатации. МС2.702.500 РЭ.
14. Калибраторы мощности КФМ-06. Интегрированные тестовые системы [Электронный ресурс]. – URL: www.enica.net.ru/products/doc/kfm-060.pdf (дата обращения: 22.03.2018).
15. National Instruments. What is LabVIEW? [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (дата обращения: 22.03.2018).

Пасынков Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета, заслуженный изобретатель Российской Федерации. Основное направление научных исследований – измерение параметров периодических сигналов. Имеет более 200 публикаций, в том числе 2 методических пособия. E-mail: pasinkovnstu@mail.ru.

Савиных Максим Александрович, аспирант кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – измерительные трансформаторы тока. Имеет 13 публикаций. E-mail: bigmax.sav@gmail.com.

Technological control of metrological characteristics of electricity meters in manufacturing*

YU.A. PASINKOV¹, M.A. SAVINYKH²

¹ Novosibirsk State Technical University, 136, Nemorovicha-Danchenko St., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: pasinkovnstu@mail.ru

² Novosibirsk State Technical University, 136, Nemorovicha-Danchenko St., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate. E-mail: bigmax.sav@gmail.com

Modern electricity meters have a lot of different functions such as net parameters measurement and storing, load commutation, data communication by interfaces, etc. However, their main function is electric power measurement. So, metrological control of produced electricity meters is an important and responsible operation during production. Two main methods of meter error definition are described in the paper: the reference meter comparison method with and the stabilized power method. Their comparison analysis is also made. It is revealed that the stabilized power method is more convenient for technological control during manufacturing. Using this method we can control a number of metrological characteristics without any additional measuring equipment, for example: metering errors of current, voltages, and frequency measurements, shunt running detection and sensitive threshold control. An automated stand based on the measuring generator KFM-06 was developed in accordance with this method. Errors of the tested meter are defined by the period of a signal from the meter test output. For period measurements the built-in KFM-06 measuring module is used. This paper describes the functional scheme and principle of operation of the developed test bench. It shows advantages of using this method instead of old test benches which worked using the reference meter comparison method. These advantages include control of larger electric parameter quantities, automation of testing process and hence decreasing tests errors related to the human factor, as well as increasing the performance in whole.

Keywords: electricity meter, metrological characteristics, technological control, error, fictitious power generator, period measurement, automated test bench, LabVIEW, performance

REFERENCES

1. Mamaev A. *DLMS/COSEM – otkrytyi protokol dlya obmena dannymi s priborami ucheta*. Ch. 1: *kratkii obzor* [DLMS/COSEM – open protocol for data communication with metering devices. Pt. 1: brief view]. Available at: <https://habrahabr.ru/post/302246/> (accessed 22.03.2018).
2. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 4 maya 2012 g. № 442 "O funktsionirovanii roznichnykh rynkov elektricheskoi energii, polnom i (ili) chastichnom ogranichenii rezhima potrebleniya elektricheskoi energii"* [Decree of the Government of the Russian Federation of May 4, 2012 No. 442 "On the functioning of retail electricity markets, full and (or) partial restriction of the regime of electricity consumption"].
3. *Schetchiki elektricheskoi energii proizvodstva AO "RiM"* [Electricity meters produced by company "RiM"]. Available at: www.zao-rim.ru/cat_cntrs (accessed 22.03.2018).
4. *Schetchiki elektricheskoy energii proizvodstva AO "Elektrotekhnicheskie zavody "Energomera"* [Electricity meters produced by company "Energomera"]. Available at: www.energomera.ru/ru/products/meters (accessed 22.03.2018).
5. *Schetchiki elektricheskoi energii proizvodstva OOO "NPK "Inkoteks"* [Electricity meters produced by company "NPK "Inkoteks"]. Available at: www.incotexcom.ru/counters.htm (accessed 22.03.2018).

* Received 08 August 2017.

6. GOST 8.401–80. *Klasy tochnosti sredstv izmerenii. Obshchie trebovaniya* [State Standard 8.401–80. Accuracy classes of measuring instruments. General requirements]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1981.

7. *Federal'nyi zakon ot 26.06.2008 N 102-FZ (red. ot 13.07.2015) "Ob obespechenii edinstva izmerenii"* [Federal law from 26.06.2008 N 102-FZ (red. from 13.07.2015) "About ensuring the uniformity of measurements"].

8. GOST 8.584–2004. *Schetchiki staticheskie aktivnoi elektricheskoi energii peremennogo toka. Metodika poverki* [State Standard 8.584–2004. Alternating current static meters for active energy. Methods of verification]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2004.

9. GOST 13607–68. *Pribory i preobrazovateli elektroizmeritel'nye tsifrovye. Osnovnye terminy i opredeleniya* [State Standard 13607–68. Digital electrical measuring instruments and converters. Fundamental terms and definitions]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1994.

10. *Calmet. Power calibrators and power quality calibrators*. Available at: www.calmet.com.pl/eng/pages/detail.php?product=pwr (accessed 22.03.2018).

11. *Fluke. Calibration. 6105A, 6100B Electrical Power Quality Calibrator*. Available at: <https://us.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a-6100b-electrical-power-quality-calibrat> (accessed 22.03.2018).

12. *Meantest. Oborudovanie dlya tochnykh izmerenii i kalibrovki. Kalibratory moshchnosti/energii Calibro 133C/133Ci* [Meantest. Equipment for precision measurements and calibrations. Calibrators of power/energy Calibro 133C/133Ci]. Available at: <http://www.meatest.ru/index.php/production/kalibratory-moshchnosti-energii/84-kalibratory-moshchnosti-energii-calibro-133c-133ci> (accessed 22.03.2018).

13. *Ustanovka poverochnaya universal'naya "UPPU-ME 3.1KM-S". Rukovodstvo po ekspluatatsii. MS2.702.500 RE* [Universal verification plant "UPPU-ME 3.1KM-C". Manual. MC2.702.500 RE].

14. *Kalibratory moshchnosti KFM-06. Integrirovannye testovye sistemy* [Kalibrators of power KFM-06. Integated testing systems]. Available at: <http://www.enica.net.ru/products/doc/kfm-060.pdf> (accessed 22.03.2018).

15. *National Instruments. What is LabVIEW?* (In Russian). Available at: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (accessed 22.03.2018).

Для цитирования:

Пасынков Ю.А., Савиных М.А. Технологический контроль метрологических характеристик счетчиков электроэнергии на производстве // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 177–188. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188.

For citation:

Pasinkov Y.A., Savinykh M.A. Tekhnologicheskii kontrol' metrologicheskikh kharakteristik schetchikov elektroenergii na proizvodstve [Technological control of metrological characteristics of electricity meters in manufacturing]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no.1 (70), pp. 177–188. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188.

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000 года. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Научный вестник НГТУ» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

05.07.00 – Авиационная и ракетно-космическая техника;

05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление;

05.14.00 – Энергетика;

05.17.00 – Химическая технология.

Разделы журнала: автоматическое управление и идентификация; обработка информации; моделирование процессов и устройств; современные информационные технологии; энергетика, химическая технология.

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.

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

Условия приема статей

В редакцию **Научного вестника НГТУ** представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора) – 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.

7. Авторы, не являющиеся сотрудниками НГТУ, предоставляют сопроводительное письмо на имя проректора по научной работе НГТУ.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригиналов – А4. Шрифт – **Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3	верхнее поле – 4,0
правое поле – 3,3	нижнее поле – 3,9
текстовое поле 22 × 14,4	

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см с межстрочным интервалом с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение, Постановка задачи, Методы анализа, Основной результат, Выводы** или **Заключение** – прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Подрисуночные надписи и названия таблиц – кеглем 9. Слово *Рис.* и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в подписях не должно быть ссылок на цвет.

Переменные в тексте – 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 – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым):

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha.$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул помещать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \quad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: Файл / Параметры страницы / Разметка; установить **разные четные и нечетные** и **первая отличается**.

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди – у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи – с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8. Номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пропускается пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы – пустая строка размером 10. Порядковый номер – с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка – по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и с отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий, e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом.

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте <http://vestnik.infoterra.ru/index.php>