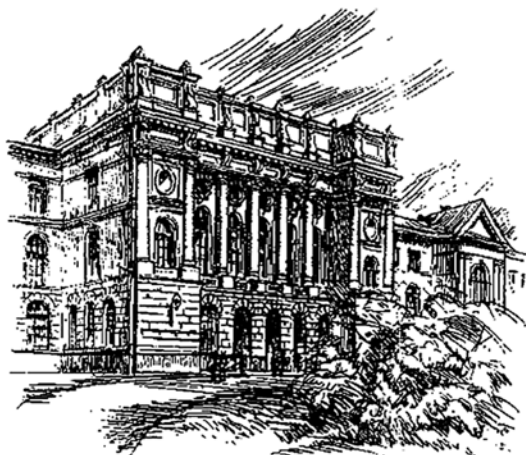




НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

5(181) 2013

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Васильев Ю.С., академик РАН (председатель); *Алферов Ж.И.*, академик РАН;
Костюк В.В., академик РАН; *Лагерьков А.Н.*, академик РАН;
Лопота В.А., чл.-кор. РАН; *Окрепилов В.В.*, академик РАН;
Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН; *Примаков Е.В.*, академик РАН;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН; *Федоров М.П.*, академик РАН.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Васильев Ю.С., академик РАН (главный редактор); *Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор (зам. гл. редактора);
Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор; *Глухов В.В.*, д-р экон. наук, профессор;
Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор; *Иванов А.В.*, д-р техн. наук, профессор;
Иванов В.К., д-р физ.-мат. наук, профессор; *Козловский В.В.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН (зам. гл. редактора); *Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН.

ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;
Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;
Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;
Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;
Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;
Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор – зам. председателя;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор – зам. председателя;
Антонов В.И., д-р техн. наук, профессор;
Голландцев Ю.А., д-р техн. наук, профессор;
Карпов Ю.Г., д-р техн. наук, профессор;
Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор;
Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор;
Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор;
Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор;
Шкодырев В.П., д-р техн. наук, профессор;
Клавдиев В.Е., канд. техн. наук, доцент.

Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук. С 2008 года выпускается в составе серийного периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» ISSN 1994-2354.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Подписной индекс **47517** в каталоге «Газеты. Журналы» Агентства «Роспечать».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

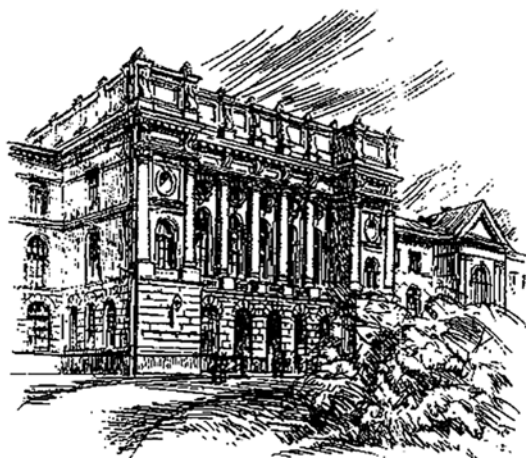
Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Тел. редакции (812) 552-62-16.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

5(181) 2013

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2013

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

EDITORIAL COUNCIL

Y.S. Vasiliev – full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St. Petersburg State Polytechnical University, editor-in-chief; *Zh.I. Alferov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Kostiuk* – full member of the Russian Academy of Sciences; *A.N. Lagar'kov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Lopota* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Okrepilov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *B.E. Paton* – full member of the Russian Academy of Sciences and the National Academy of Sciences of Ukraine; *E.M. Primakov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *A.I. Rudskoy* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *M.P. Fedorov* – full member of the Russian Academy of Sciences.

EDITORIAL BOARD

Y.S. Vasiliev – full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St. Petersburg State Polytechnical University, editor-in-chief; *D.G. Arseniev* – Dr.Sc.(tech.), prof.; *A. V. Babkin* – Dr.Sc. (econ.), prof., deputy editor-in-chief; *V.N. Boronin* – Dr.Sc.(tech.), prof.; *V.V. Glukhov* – Dr.Sc. (econ.), prof.; *R.V. Degtyareva* – Dr.Sc. (history), prof.; *A. V. Ivanov* – Dr.Sc.(tech.); *V.K. Ivanov* – Dr.Sc.(phys.-math.), prof.; *V.V. Kozlovsky* – Dr.Sc.(phys.-math.), prof.; *A.I. Rudskoy* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences, deputy editor-in-chief; *R.M. Yusupov* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences.

COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

JOURNAL EDITORIAL COUNCIL

R.M. Yusupov – corresponding member of the Russian Academy of Sciences, head of the editorial council; *S.M. Abramov* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Voevodin* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *V.S. Zaborovsky* – Dr.Sc.(tech.), prof.; *V.N. Kozlov* – Dr.Sc.(tech.), prof.; *A.E. Fotiadi* – Dr.Sc.(phys.-math.), prof.; *I.G. Chernorutsky* – Dr.Sc.(tech.), prof.

JOURNAL EDITORIAL BOARD

R.M. Yusupov – corresponding member of the Russian Academy of Sciences, head of the editorial board;
D.G. Arseniev – Dr.Sc.(tech.), prof., deputy head of the editorial board;
A. V. Babkin – Dr.Sc. (econ.), prof., deputy head of the editorial board;
V.I. Antonov – Dr.Sc.(tech.), prof.;
Y.A. Gollandtsev – Dr.Sc.(tech.), prof.;
Y.G. Karpov – Dr.Sc.(tech.), prof.;
A.S. Korotkov – Dr.Sc.(tech.), prof.;
S.B. Makarov – Dr.Sc.(tech.), prof.;
S.M. Ustinov – Dr.Sc.(tech.), prof.;
I.A. Tsikin – Dr.Sc.(tech.), prof.;
V.P. Shkodyrev – Dr.Sc.(tech.), prof.;
V.Ye. Klavdiev – Candidate of Technical Sciences, associate prof.

The journal is published under scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995. The journal is published since 2008 as part of the periodical edition «Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU» (ISSN 1994-2354).

The journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals and other editions to publish major findings of PhD theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences.

The publications are presented in the VINITI RAS Abstract Journal and Ulrich's Periodical Directory International Database.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-51457 issued Oct. 19, 2012.

Subscription index **47517** in the «Journals and Magazines» catalogue, Rospechat agency.

The journal is on the Russian Science Citation Index (RSCI) database

© Scientific Electronic Library (<http://elibrary.ru/>).

No part of this publication may be reproduced without clear reference to the source.

The views of the authors can contradict the views of the Editorial Board.

The address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

Содержание

Проблемы передачи и обработки информации

Чесноков М.А. Цифровой гребенчатый фильтр с линией задержки продолжительностью в дробное число отсчетов.....	9
Семаков Н.В., Сороцкий В.А. Влияние инерционности ключевых приборов на искажение сигналов в усилителях мощности радиопередающих устройств	16

Системный анализ и управление

Маркелов Г.Я. Метод сценариев при управлении в реальном времени	23
--	----

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Черноруцкий И.Г. Петербургская научная школа жесткой оптимизации (история и обзор основных научных результатов)	29
Андреа К., Шевляков Г.Л. Обнаружение выбросов с помощью боксплотов, основанных на новых высокоэффективных робастных оценках масштаба	39
Евдокунин Г.А., Попков Е.Н. Принципы имитационного моделирования процессов в электроэнергетических системах	46
Логинов А.Л., Потехин В.В., Акулов Д.В., Хритonenков А.К., Полетаев И.Г. Интеллектуальная система управления автономной ветроэлектростанцией	50
Черноруцкий И.Г. Градиентные методы с экспоненциальной функцией релаксации	58
Кучинский В.Г., Попков Е.Н., Чайка В.М. Управляемые преобразователи частоты для регулируемых приводов	67

Приборы, информационно-измерительные системы

Толкович Д.В., Марусина М.Я., Суворов Н.Б., Козаченко А.В. Многофункциональная биотехническая система для изучения физиологических сигналов при интеллектуальной деятельности	73
--	----

Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

Коваженков М.А., Коротеев М.В., Сидорова Е.Е. Применение когнитивных моделей для оценки инновационного потенциала высшего учебного заведения	79
Нестеров С.А., Сметанина М.В. Оценка качества тестовых заданий средствами среды дистанционного обучения MOODLE.....	87

Экстремальная робототехника

Герасимов В.Н. Система управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями	94
Девятериков Е.А., Михайлов Б.Б. Система управления движением мобильного робота с визуальным одометром	103

Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. <i>Этапы движения четырехзвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности</i>	109
Голубева О.А., Ильин А.С., Прямыцын И.Б., Шмаков О.А. <i>Особенности программирования управления линейными перемещениями робота</i>	119
Нгуен А.В., Михайлов Б.Б. <i>Способ распознавания многогранных пространственных объектов</i>	125

Конференции

Ицыксон В.М. <i>Инструменты и методы анализа программ: новая конференция по программной инженерии</i>	132
--	-----

Contents

Information Transfer and Processing

Chesnokov M.A. <i>Digital comb filter in the devices of noise reduction of speech signals.....</i>	9
Semakov N.V., Sorotsky V.A. <i>The influence of switch devices' response time on signal distortion in power amplifiers of radio transmitters.....</i>	16

System Analysys and Control

Markelov G.Ya. <i>Method of scenarios in the management of real time.....</i>	23
--	----

Mathematical Modelling: Methods, Algorithms, Technologies

Chernorutskiy I.G. <i>St. Petersburg scientific school of stiff optimization (history and review of main scientific results).....</i>	29
Andrea K., Shevlyakov G.L. <i>Outlier detection with boxplots based on new highly efficient robust estimates of scale.....</i>	39
Evdokunin G.A., Popkov E.N. <i>Concepts of simulation modelling of processes in electric power systems</i>	46
Loginov A.L., Potekhin V.V., Akulov D.V., Khritonenkov A.K., Poletaev I.G. <i>Intelligent control system of autonomous wind farm.....</i>	50
Chernorutskiy I.G. <i>Gradient methods with exponent relaxation function.....</i>	58
Kuchinsky V.G., Popkov E.N., Chayka V.M. <i>Control current inverter for variable speed drive motors ...</i>	67

Devices, Information-Measuring Systems

Tolkovich D.V., Marusina M. Ya., Suvorov N. B., Kozachenko A.V. <i>Multifunctional biotechnical system for the study physiological signals of intellectual activity</i>	73
--	----

Information and Telecommunication Technologies in Education

Kovazhenkov M.A., Koroteev M.V., Sidorova E.E. <i>Application of cognitive model for the estimation of innovative potential of high school.....</i>	79
Nesterov S.A., Smetanina M.V. <i>Quality measurement of the test tasks in the Learning Management System Moodle.....</i>	87

Extreme Robotics

Gerasimov V.N. <i>The motion control system of the mobile robot in environment with dynamic obstacles ...</i>	94
Dev'yaterikov E. A., Mikhailov B.B. <i>Mobile robot movement control system with visual odometer</i>	103
Jatsun S.F., Loktionova O.G., Volkova L.Yu., Vorochaev A.V. <i>Stages of movement of the fourlink robot moving with the jump from the surface</i>	109
Golubeva O.A., Il'yin A.S., Pryamitsyn I.B., Shmakov O.A. <i>Features of programming of management of linear movements of the robot</i>	119

Nguyen A.V., Mikhailov B.B. <i>The method of multifaceted spatial objects recognizing</i>	125
--	-----

Conferences

Itsyson V.M. <i>Tools & Methods of Program Analysis: the new conference in Software Engineering.....</i>	132
---	-----

УДК 62-533.4

М.А. Чесноков

ЦИФРОВОЙ ГРЕБЕНЧАТЫЙ ФИЛЬТР С ЛИНИЕЙ ЗАДЕРЖКИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ В ДРОБНОЕ ЧИСЛО ОТСЧЕТОВ

М.А. Chesnokov

DIGITAL COMB FILTER IN THE DEVICES OF NOISE REDUCTION OF SPEECH SIGNALS

Устройства шумоподавления речевых сигналов предназначены для повышения разборчивости речи в системах распознавания и в устройствах индивидуальной слухокоррекции — слуховых аппаратах. В звукотехнических системах широкое распространение получила технология Noise Gate. Технология Noise Gate, являясь инвариантной к виду спектра входного сигнала, не учитывает особенностей речевого сигнала, что ограничивает возможности ее применения. Эта особенность состоит в том, что в спектре речевого сигнала присутствуют кратные, т. е. периодические составляющие для вокализованных участков речи. Периодичность речевого сигнала позволяет использовать согласованный гребенчатый фильтр для выделения сигнала из смеси с шумами. Данная статья посвящена разработке метода реализации цифрового гребенчатого фильтра (ГФ) для подавления шумов в речевом сигнале.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ. ГРЕБЕНЧАТЫЙ ФИЛЬТР. ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЙ ПОЛИНОМ. МНОГОЧЛЕН ЛАГРАНЖА. ПЕРИОДИЧЕСКИЙ СИГНАЛ.

Device noise reduction of speech signals are designed to improve speech recognition systems and hearing aids. In Acoustic sound system technology has spread widely Noise Gate. Technology Noise Gate, being invariant to mean spectrum of the input signal does not include the features of the speech signal, which limits its application. This feature consists that the spectrum of the speech signal has periodic components for the voiced parts of speech. The frequency of the speech signal allows the use of an agreed comb filter to separate the signal from the mixture with noise. This paper focuses on the development of the method of the digital comb filter (CF) for noise suppression in speech signal.

DIGITAL SIGNAL PROCESSING. COMB FILTER. POLYNOMIAL INTERPOLATION. LAGRANGE POLYNOMIAL. PERIODIC SIGNAL.

Устройства шумоподавления речевых сигналов предназначены для повышения разборчивости речи в системах распознавания и в устройствах индивидуальной слухокоррекции — слуховых аппаратах [1–4]. В настоящее время широкое распространение получила технология Noise Gate [5–7], применение которой направлено на шумоподавление речевого сигнала. Эта техноло-

гия основана на выделении в энергетическом спектре речевого сигнала частотных полос, энергия которых выше заданного порогового уровня. При установлении величины порогового уровня используются неоднозначные субъективные критерии, зависящие от вида шумовой помехи. Технология Noise Gate, являясь инвариантной к виду спектра входного сигнала, не учиты-

вает особенность речевого сигнала, состоящую в том, что в спектре речевого сигнала присутствуют кратные, т. е. периодические, составляющие для вокализованных участков речи. Между тем в ряде технических приложений на базе принципа активной локации используется периодичность спектра источника сигнала для выделения информации о свойствах источника [8], о его местоположении [9].

Периодичность речевого сигнала позволяет использовать для шумоподавления речевых сигналов методы приема сигналов, применяемые в системах активной локации. Для этого необходимо решить практическую задачу адаптации этих методов и, в частности, метода построения согласованного гребенчатого фильтра [7, 10] с целью повышения разборчивости речи в системах распознавания и в устройствах индивидуальной слухокоррекции.

Актуальность решения этой задачи для систем распознавания речи определяется актуальностью использования самих систем в задачах общего и специального назначения. Что касается индивидуальных устройств слухокоррекции, то актуальность решения задачи вызвана необходимостью увеличения разборчивости речи в условиях постоянно увеличивающегося уровня шума окружающей среды за счет работы механизмов и наличия стационарного шума при большом скоплении людей.

Данная статья посвящена разработке метода реализации цифрового гребенчатого фильтра (ГФ) в составе цифрового слухового аппарата для подавления шумов в речевом сигнале.

Постановка задачи

Выходной сигнал ГФ формируется как сумма входного сигнала и выходного сигнала, задержанного линией задержки на время τ и умноженного на коэффициент обратной связи $g < 1$. Гребенчатый фильтр является многополосным полосовым фильтром (ПФ), амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которого достигает максимумов на частотах $0, 1/\tau, 2/\tau, \dots, n/\tau$, где n — натуральное число, соответствующее номеру полосы пропускания ГФ. Гребенчатый

фильтр используется в качестве фильтра, согласованного с периодическим сигналом, при этом частоты максимумов в спектре сигнала совпадают с частотами максимумов АЧХ ГФ. При цифровой реализации ГФ линию задержки можно представить как область памяти, например, в виде регистра сдвига. Тогда находящиеся в нем числа представляют собой выборки значений выходного сигнала, а соседние значения разделяются интервалом времени, равным периоду дискретизации системы $\Delta\tau$. Таким образом, сигнал на выходе линии задержки ГФ может быть задержан относительно сигнала на входе ГФ только на интервалы времени, кратные периоду дискретизации системы. Если это условие не выполняется, то есть $\tau \neq n^*\Delta\tau$, где n — натуральное число, то частоты максимумов АЧХ ГФ не совпадают с частотами максимумов в спектре сигнала. Более того, гребенчатый фильтр вместо подавления помех начинает выделять спектральные составляющие помех, отсутствующих в полезном сигнале.

Проиллюстрируем этот факт на примере работы цифрового ГФ с частотой дискретизации $f_d = 8$ кГц и периодом дискретизации $\Delta\tau = 1/f_d = 0,125$ мс. Пусть на вход подается синтетический речеподобный сигнал, состоящий из ряда гармоник с разными амплитудами и частотой основного тона (ОТ) $f_{от} = 355$ Гц, что соответствует верхнему порогу частоты ОТ для женского голоса [4]. Период ОТ равен $\Delta\tau_{от} = 1/f_{от} = 2,8$ мс, и выраженный в периодах дискретизации нормированный период ОТ приблизительно равен $n_{от} = \Delta\tau_{от}/\Delta\tau \approx 22,5$.

При округлении нормированного периода до ближайшего целого как в меньшую сторону $n_1 = 22$ (частота первого пика АЧХ $f = 363,6$ Гц), так и в большую сторону $n_2 = 23$ ($f = 347,8$ Гц) максимумы АЧХ фильтра сместятся.

На рис. 1 представлены результаты моделирования гребенчатого фильтра в среде Matlab, иллюстрирующие процесс смещения АЧХ фильтра относительно максимумов спектральной плотности тестового входного сигнала при отсутствии кратности между периодом основного тона и периодом дискретизации.

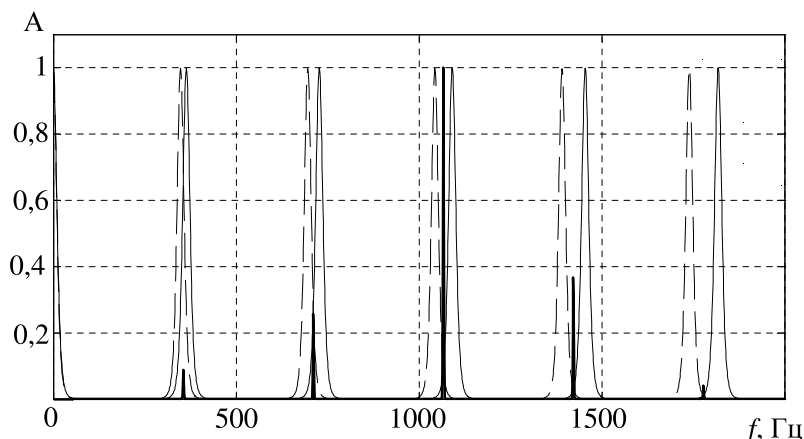


Рис. 1. Результаты моделирования гребенчатого фильтра в среде Matlab:
 (—) — нормированная спектральная плотность тестового входного сигнала;
 (---) — нормированная АЧХ ГФ при округлении задержки фильтра до 22 периодов дискретизации; (.....) — нормированная АЧХ ГФ при округлении задержки фильтра до 23 периодов дискретизации

Как видно из графиков, приведенных на рисунке, при любом способе округления максимумы АЧХ ГФ уже на второй и последующих гармониках достаточно сильно отстоят от максимумов спектрального распределения входного сигнала. Это означает, что на этих гармониках полезный сигнал не выделяется, а подавляется. Более того, выделяются спектральные составляющие помех в окрестности гармонических составляющих. В реальном сигнале частота основного тона меняется во времени и, следовательно, простая модель цифрового ГФ оказывается неэффективной.

Сформулируем следующую задачу. Пусть необходимо разработать цифровой ГФ, согласованный с сигналом, дискретный спектр которого состоит из ряда гармоник с частотами $f_1 = f$, $f_2 = 2f$, $f_3 = 3f$, Значение частоты дискретизации f_d не кратно частотам гармоник, включая частоту основного тона f .

Интерполяционный алгоритм

Решим данную задачу, используя процедуру интерполяции. На рис. 2 представлена структурная схема интерполяционного цифрового ГФ, включающего в себя: линию задержки (ЛЗ) с двумя отводами на время задержки, соответственно τ_1 , τ_2 ; интерpolator (ИНТ); усилитель с коэффициентом

передачи g и сумматор. Интерpolator реализует процедуру интерполяции, т. е. нахождения сигнала $y(\tau)$, являющегося оценкой выходного сигнала на выходе линии задержки при задержке τ , по дискретным значениям задержки на отводах ЛЗ, ближайшим к значению $\tau = 1/f$ на временной оси. Полученная оценка $y(\tau)$ направляется в сумматор.

С целью интерполяции необходимо использовать два ближайших к τ значения времени задержки τ_1 и τ_2 , кратных периоду дискретизации $\Delta\tau$, то есть $\tau_1 < \tau < \tau_2$, $\tau_2 = \tau_1 + \Delta\tau$.

Искомая интерполяционная функция записывается в виде $y(\tau) = a_0 + a_1 \cdot \tau$. Для точек сигнала, соответствующих временам τ_1 и τ_2 , можно записать систему уравнений

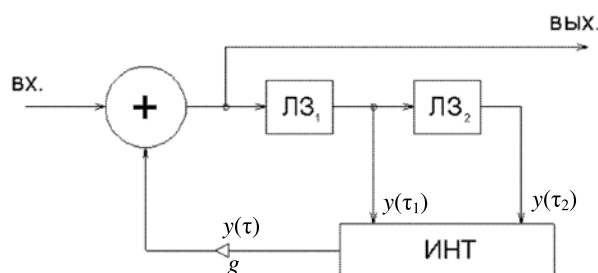


Рис. 2. Структурная схема гребенчатого фильтра с интерpolatorом по двум отсчетам

$$\begin{cases} y(\tau_1) = a_0 + a_1 \cdot \tau_1 \\ y(\tau_2) = a_0 + a_1 \cdot \tau_2 \end{cases}$$

Решение системы имеет вид

$$\begin{cases} a_1 = \frac{y(\tau_1) - y(\tau_2)}{\tau_1 - \tau_2} \\ a_0 = y(\tau_2) - \frac{y(\tau_1) - y(\tau_2)}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \tau_2 \end{cases}$$

Интерполируемый сигнал в точке, соответствующей времени τ , находится по формуле:

$$y(\tau) = y(\tau_2) - \frac{y(\tau_1) - y(\tau_2)}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \tau_2 + \frac{y(\tau_1) - y(\tau_2)}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \tau. \quad (1)$$

Для удобства дальнейших преобразований обозначим

$$C = \frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \quad (2)$$

и подставим (2) в (1)

$$y(\tau) = y(\tau_1)C + y(\tau_2)(1 - C).$$

Удостоверимся в том, что полученная таким образом оценка действительно с большой точностью обеспечивает совпадение частот экстремумов АЧХ ГФ и частот экстремумов сигнала. Запишем уравнение непрерывности для системы ГФ, использующей интерполятор,

$$U_{\text{ВЫХ}}(j\omega) = U_{\text{ВХ}}(j\omega) + g(U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)e^{-j\omega\tau_1}C + U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)e^{-j\omega\tau_2}(1 - C)), \quad (3)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(j\omega) = \frac{U_{\text{ВХ}}(j\omega)}{1 - gCe^{-j\omega\tau_1}C - g(1 - C)e^{-j\omega\tau_2}}.$$

Из (3) находим передаточную функцию гребенчатого фильтра (ГФ):

$$T(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{1}{1 - gCe^{-j\omega\tau_1}C - g(1 - C)e^{-j\omega\tau_2}}.$$

Выражение для расчета модуля передаточной функции имеет вид:

$$\begin{aligned} |T(j\omega)| &= \sqrt{\frac{1}{1 - gC \cos(\omega\tau_1) + jgC \sin(\omega\tau_1) - g(1 - C) \cos(\omega\tau_2) + jg(1 - C) \sin(\omega\tau_2)}} \times \\ &\times \sqrt{\frac{1}{1 - gC \cos(\omega\tau_1) - jgC \sin(\omega\tau_1) - g(1 - C) \cos(\omega\tau_2) - jg(1 - C) \sin(\omega\tau_2)}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - 2gC \cos(\omega\tau_1) - 2g(1 - C) \cos(\omega\tau_2) + g^2C^2 + 2g^2C(1 - C) \cos(\omega\tau_1) \cos(\omega\tau_2) + \\ &+ 2g^2C(1 - C) \sin(\omega\tau_1) \sin(\omega\tau_2)}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляем (2) в (4):

$$\begin{aligned} |T(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{1 - 2g\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}\right) \cos(\omega\tau_1) - 2g\left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2}\right) \cos(\omega\tau_2) + g^2\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}\right)^2 + \\ &+ 2g^2\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}\right)\left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2}\right) \cos(\omega\tau_1) \cos(\omega\tau_2) + 2g^2\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}\right)\left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2}\right) \sin(\omega\tau_1) \sin(\omega\tau_2)}}. \end{aligned}$$

Найдем точки экстремума функции $|T(j\omega)|$. Так как точки экстремума функ-

ций $|T(j\omega)|$ и $|T(j\omega)|^2$ совпадают, то рассмотрим выражение для квадрата модуля:

$$|T(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 - 2g\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}\right) \cos(\omega\tau_1) - 2g\left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2}\right) \cos(\omega\tau_2) + g^2\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}\right)^2 + 2g^2\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}\right)\left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2}\right) \cos(\omega\tau_1) \cos(\omega\tau_2) + 2g^2\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}\right)\left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2}\right) \sin(\omega\tau_1) \sin(\omega\tau_2)}.$$

$$+2g^2 \left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2} \right) \cos(\omega\tau_1) \cos(\omega\tau_2) + 2g^2 \left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2} \right) \sin(\omega\tau_1) \sin(\omega\tau_2)$$

Обратимся к производной и приравняем ее к нулю:

$$\frac{d|T(j\omega)|^2}{d\omega} = |T(j\omega)|^4 \left[2g \left(\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \sin(\omega\tau_1) + \left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2} \right) \sin(\omega\tau_2) \right) \right] = 0. \quad (5)$$

Из (5) следует, что точками экстремума функции $|T(j\omega)|$ являются корни уравнения:

$$\left(\frac{\tau - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \sin(\omega\tau_1) + \left(\frac{\tau_1 - \tau}{\tau_1 - \tau_2} \right) \sin(\omega\tau_2) = 0. \quad (6)$$

Ввиду отсутствия аналитического решения его корни могут быть найдены численными методами.

В качестве примера рассмотрим интерполяционный цифровой ГФ со следующими параметрами: частота дискретизации $f_d = 8$ кГц; $\tau_1 = 2,7$ мс (22 отсчета сигнала – $f_1 = 363,6$ Гц); $\tau_2 = 2,9$ мс (23 отсчета сигнала – $f_2 = 347,8$ Гц); $\tau = 2,8$ мс (22,5 отсчета сигнала – $f = 355,5$ Гц); коэффициент обратной связи $g = 0,7$. На рис. 3 представлены результаты моделирования в среде Matlab в виде трех нормированных АЧХ.

Из графиков на рисунке видно, что положение экстремума на частотной оси ин-

терполяционного ГФ совпадают с заданным значением $f = 1/\tau$. Это же значение получено при расчете по формуле (6).

Рассмотренный алгоритм построения интерполяционного цифрового ГФ по двум точкам интерполяции распространяется на общий случай нескольких точек с использованием интерполяционного полинома Лагранжа [11].

Сравнительный анализ результатов

Все способы оценки эффективности методов шумоподавления разделяются на две группы: объективные и субъективные. Степень эффективности в объективном методе может оцениваться коэффициентом улучшения отношения сигнал/шум на выходе системы по сравнению с этим отношением на ее входе [12]. Субъективные методы основаны на экспертных оценках разборчивости речи в результате проведения большого количества артикуляционных испытаний с участием экспертов [12, 13]. Для сравнительной оценки эффективности обратимся к объективному методу, используя сравнение коэффициентов улучшения.

В рамках предлагаемой методики было проведено моделирование в среде Matlab схемы, приведенной на рис. 2. На вход схе-

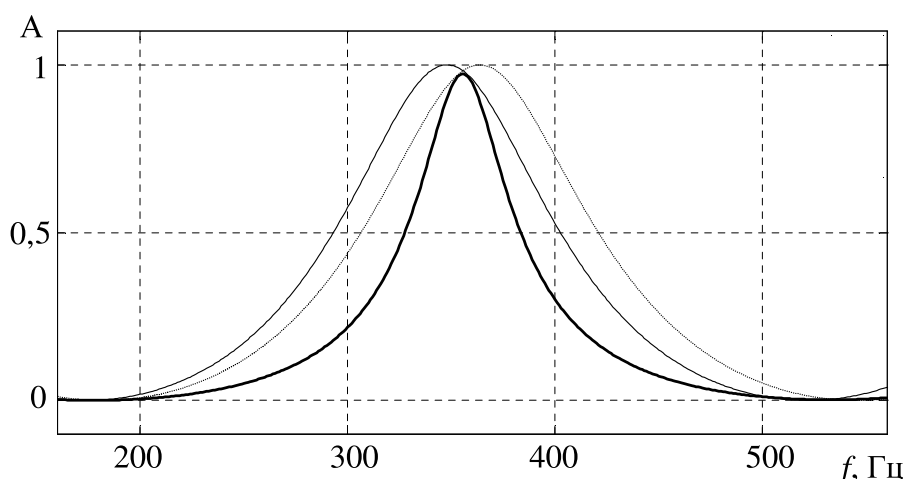


Рис. 3. Результаты моделирования в среде Matlab:
(.....) – АЧХ интерполяционного цифрового ГФ с задержкой τ_1 ;
(— · —) – АЧХ ГФ с задержкой τ_2 ; (—) – АЧХ ГФ с задержкой τ

Зависимость улучшения ОСШ от коэффициента обратной связи ГФ g

g	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ОСШ _{ул} , дБ	0,89	1,74	2,84	3,85	5,07	6,35	8,26	10,6	14,6

мы подавался синтетический речеподобный сигнал, состоящий из ряда гармоник с разными амплитудами, и частотой основного тона (ОТ) $f_{от} = 355$ Гц в смеси с белым шумом. В таблице приведены коэффициенты улучшения, полученные в результате моделирования, для различных значений коэффициентов обратной связи фильтра.

Величина квазистационарных интервалов в вокализированной речи [4] и время переходных процессов фильтра [10] не допускают применение коэффициентов обратной связи g больше 0,6. По этой причине среднее улучшение ОСШ при тестировании ГФ на обработке сигнала в аддитивной смеси с белым шумом ограничивается 6 дБ. Как справедливо отмечено в [12], приведенные значения носят условный характер, т. к. «отсутствуют методы и способы объективной оценки эффективности различных методов шумоочистки». Тем не менее, по мнению автора [12], разброс коэффициентов улучшения при использовании современных цифровых процедур обработки речи может составлять от 4 до 10 дБ, что соответствует приведенным в таблице результатам. Следует отметить, что

методы, рассмотренные в данной статье, и методы в рамках технологии Noise Gate не имеют конкурирующего характера, а являются скорее взаимодополняющими.

Цифровая реализация гребенчатого фильтра, используемого в качестве приемника, согласованного с периодическим сигналом, требует решения проблемы дискретности линии задержки, приводящей к отклонению АЧХ сигнала от АЧХ гребенчатого фильтра. В статье предложен метод интерполяции, основанный на использовании дискретных значений отсчетов сигнала, ближайших к заданному значению. Приведен пример цифровой реализации гребенчатого фильтра с интерполяцией по двум отсчетам для задачи шумоподавления вокализированных участков речи.

Рассмотренный в статье метод шумоподавления с использованием периодичности речевого сигнала основан на применении интерполяционного цифрового гребенчатого фильтра. Этот метод является дополнением к известным методам шумоподавления речевых сигналов в устройствах индивидуальной слухокоррекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рабинер, Р.** Цифровая обработка речевых сигналов [Текст] / Р. Рабинер, Р. Шафер; Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1981.
2. **Weiss, M.** Noise Reduction in Hearing Aids [Text] / M. Weiss, A.C. Newman; In Studebaker G.A., Hochberg I. (eds) // Acoustical Factors Affecting Hearing Aid Performance. — Boston: Allyn and Bacon, 1993.
3. **Ashby, Michael.** Introducing Phonetic Science [Text] / Ashby Michael, John Maidment. — Cambridge: CUP, 2005.
4. **Королёва, И.В.** Введение в аудиологию и слухопротезирование [Текст] / И.В. Королёва. — СПб.: Каро, 2012.
5. **White, Paul.** Noise-reduction Tools & Techniques [Text] / Paul White // Sound on sound. — 2012. — № 1. — P. 138–142.
6. **Lawrence, T. Hagen.** Portable System For Programming Hearing Aids (P) [Text] / Hagen Lawrence T. // J. Acoust. Soc. Am. — 2010. — Vol. 130. — Iss. 4. — P. 2311–2311.
7. **King, Brian.** Enhancing Single-Channel Speech in Wind Noise Using Coherent Modulation Comb Filtering [Text] / Brian King // MSEE Thesis. — University of Washington, 2008.
8. **Рассказов, И.Ю.** Особенности регистрации и обработки данных геоакустического контроля массива горных пород на действующем руднике [Текст] / И.Ю. Рассказов, А.Ю. Искра, Г.А. Калинов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 7. — С. 212–218.
9. **Бакулев, П.А.** Радиолокационные системы [Текст] / П.А. Бакулев. — М.: Радиотехника, 2004.
10. **Баскаков, С.И.** Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / С.И. Баскаков. — М.: Высш. школа, 2000.



11. **Березин, И.С.** Методы вычислений [Текст] / И.С. Березин, Н.П. Жидков. —М.: Наука, 1966. — Т. 1.

12. **Козлачков, С.Б.** Методические аспекты оценки защищенности речевой информа-

ции [Текст] / С.Б. Козлачков // Спецтехника и связь. —2011. — № 2. —С. 44–47.

13. **Покровский, Н.Б.** Расчет и измерение разборчивости речи [Текст] / Н.Б. Покровский. —М.: Связьиздат, 1962.

REFERENCES

1. **Rabiner R., Shafer R.** Tsifrovaia obrabotka rechevykh signalov; Per. s angl. —Moscow: Radio i sviaz', 1981. (rus)

2. **Weiss M., Newman A.C.** Noise Reduction in Hearing Aids. In Studebaker G.A., Hochberg I. (eds). Acoustical Factors Affecting Hearing Aid Performance. —Boston: Allyn and Bacon, 1993.

3. **Michael Ashby, Maidment John.** Introducing Phonetic Science. —Cambridge: CUP, 2005.

4. **Koroleva I.V.** Vvedenie v audiologiiu i slukhoprotezirovanie. —St.-Petersburg: Karo, 2012. (rus)

5. **White Paul.** Noise-reduction Tools & Techniques / Sound on sound. —2012. —№ 1. —P. 138–142.

6. **Hagen Lawrence T.** Portable System For Programming Hearing Aids (P) J. Acoust. Soc. Am. —2010. —Vol. 130. —Iss. 4. —P. 2311–2311.

7. **King Brian.** Enhancing Single-Channel Speech in Wind Noise Using Soherent Modula-

tion Comb Filtering / MSEE Thesis. —University of Washington, 2008.

8. **Rasskazov I.Iu., Iskra A.Iu., Kalinov G.A. i dr.** Osobennosti registratsii i obrabotki dannykh geoakusticheskogo kontrolya massiva gornykh porod na deistvuiushchem rudnike / Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'. — 2011. — № 7. —S. 212–218. (rus)

9. **Bakulev P.A.** Radiolokatsionnye sistemy. —Moscow: Radiotekhnika, 2004. (rus)

10. **Baskakov S.I.** Radiotekhnicheskie tsepi i signaly. —Moscow: Vyssh. shkola, 2000. (rus)

11. **Berezin I.S., Zhidkov N.P.** Metody vychislenii. —Moscow: Nauka, 1966. —Т. 1. (rus)

12. **Kozlachkov S.B.** Metodicheskie aspekty otsenki zashchishchennosti rechevoi informatsii/ Spetstekhnika i sviaz'. —2011. —№ 2. —S. 44–47. (rus)

13. **Pokrovskii N.B.** Raschet i izmerenie razborchivosti rechi. —Moscow: Sviaz'izdat, 1962. (rus)

ЧЕСНОКОВ Михаил Александрович — аспирант Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения.

191119, Россия, Санкт-Петербург, ул. Правды, д. 13.

E-mail: chesnokov.inc@gmail.com

CHESNOKOV, Michael A. St. Petersburg State University of Film and Television.

191119, Pravdy Str 13, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: chesnokov.inc@gmail.com

УДК 621.37

Н.В. Семаков, В.А. Сороцкий

ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННОСТИ КЛЮЧЕВЫХ ПРИБОРОВ НА ИСКАЖЕНИЕ СИГНАЛОВ В УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

N.V. Semakov, V.A. Sorotsky

THE INFLUENCE OF SWITCH DEVICES' RESPONSE TIME ON SIGNAL DISTORTION IN POWER AMPLIFIERS OF RADIO TRANSMITTERS

Рассмотрен метод расчета искажений, возникающих вследствие инерционности ключевых приборов при генерировании сигналов в радиопередающем устройстве. На основе математической модели установлена связь между длительностью интервалов коммутации ключевых приборов и искажениями огибающей и фазы высокочастотного заполнения генерируемых сигналов. Метод может использоваться при оценке искажений в радиопередающих устройствах, применяемых в системах радиосвязи, радионавигации и радиовещания.

РАДИОПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО. КЛЮЧЕВОЙ РЕЖИМ. ИСКАЖЕНИЕ СИГНАЛОВ.

The paper gives an overview of method for computing distortion originating due to key devices' inertance while generating signal in radio transmitters. A connection between devices' time response and envelope and carrier distortions has been established on the basis of the mathematical model of radio signal. The method can be used for distortions assessment of radio transmitters being applied in data communications, navigation or broadcasting systems.

RADIO TRANSMITTER. SWITCH MODE. SIGNAL DISTORTION.

В [1] рассмотрены способы уменьшения искажений, возникающих при генерировании радиосигналов в оконечных каскадах радиопередающих устройств (РПДУ) с использованием ключевых методов. Полученные при этом результаты основаны на широко используемом при расчете ключевых генераторов и усилителей мощности допущении о безынерционности применяемых в них приборов. Однако, принимая во внимание существующую тенденцию к увеличению коммутируемой мощности приборов и связанное с этим неизбежное ухудшение их инерционных свойств, обоснованность использования указанного выше допущения становится уже не столь очевидной. В данной ситуации при решении вопроса о применимости идеализированного подхода к расчету характеристик ключевых генераторов и усилителей мощности необходимо учитывать вносимую при этом погрешность.

Исходя из изложенного, цель данной работы — уточнение рассмотренной в [1] модели сигналов, что позволит сформулировать количественные критерии относительно необходимости учета инерционности ключевых приборов.

Учет инерционности ключевых приборов в математической модели генерируемого радиосигнала

По аналогии с [1] рассмотрим в общем виде напряжение, которое может быть сформировано с помощью набора генераторных ячеек (ГЯ), образующих усилитель мощности РПДУ (рис. 1). Здесь напряжения $U_1, U_2, \dots, U_N$ — амплитуды ступеней; $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{M1}, \alpha_{N2}$ — угловые координаты ступеней. При этом условимся, что первый индекс параметра α обозначает номер ступени, а второй индекс, принимающий значения 1 или 2, обозначает соответственно момент

начала или окончания этой ступени.

Для того чтобы учесть в модели инерционность процесса переключения усиленных приборов, воспользуемся известным приемом, в соответствии с которым закон изменения напряжения на ключах на интервалах времени коммутации принято аппроксимировать линейной зависимостью [2]. В этом случае импульсы напряжения на выходе ГЯ приобретут вместо идеализированной прямоугольной формы, как это было рассмотрено в [1], трапецеидальную форму (см. рис. 1). Будем полагать в первом приближении длительности интервалов нарастания и спада напряжения на ключах одинаковыми и равными $\nu = \omega t_\phi$.

В соответствии с методом наложения ток, протекающий в антенне РПДУ, может быть представлен в виде суперпозиции токов $i_n(t)$, обусловленных воздействием знакопеременной последовательности им-

пульсов $u(t)$ трапецеидальной формы с амплитудами U_n , угловыми координатами α_{n1} , α_{n2} ($n = 1, 2, \dots, N$) и длительностью интервалов фронта и спада напряжения ν :

$$i_A(t) = \sum_{n=1}^N i_n(t). \quad (1)$$

Каждый из импульсов последовательности $u(t)$ удобно представить в виде суперпозиции двух ступеней напряжения, сдвинутых во времени друг относительно друга и имеющих противоположную полярность (рис. 2):

$$u(t) = (-1)^{n+1} \frac{U_n}{t_\phi} [1^*(t - \alpha_{n1} / \omega) - 1^*(t - (\alpha_{n2} / \omega - t_\phi))], \quad (2)$$

где $1^*(t) = \begin{cases} t, & 0 < t < t_\phi, \\ 1, & t \geq t_\phi \end{cases}$, ω — круговая частота генерируемых колебаний.

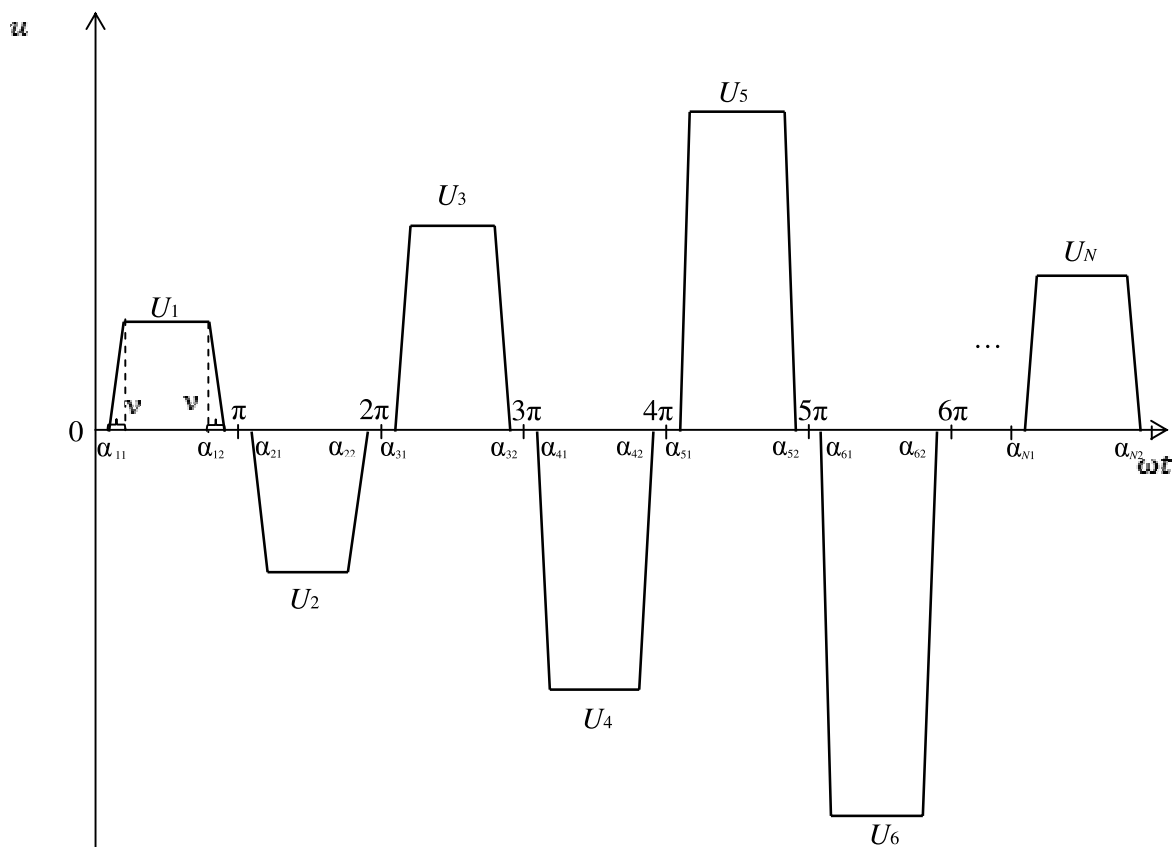


Рис. 1. Форма выходного напряжения усилителя мощности с учетом инерционности ключевых приборов

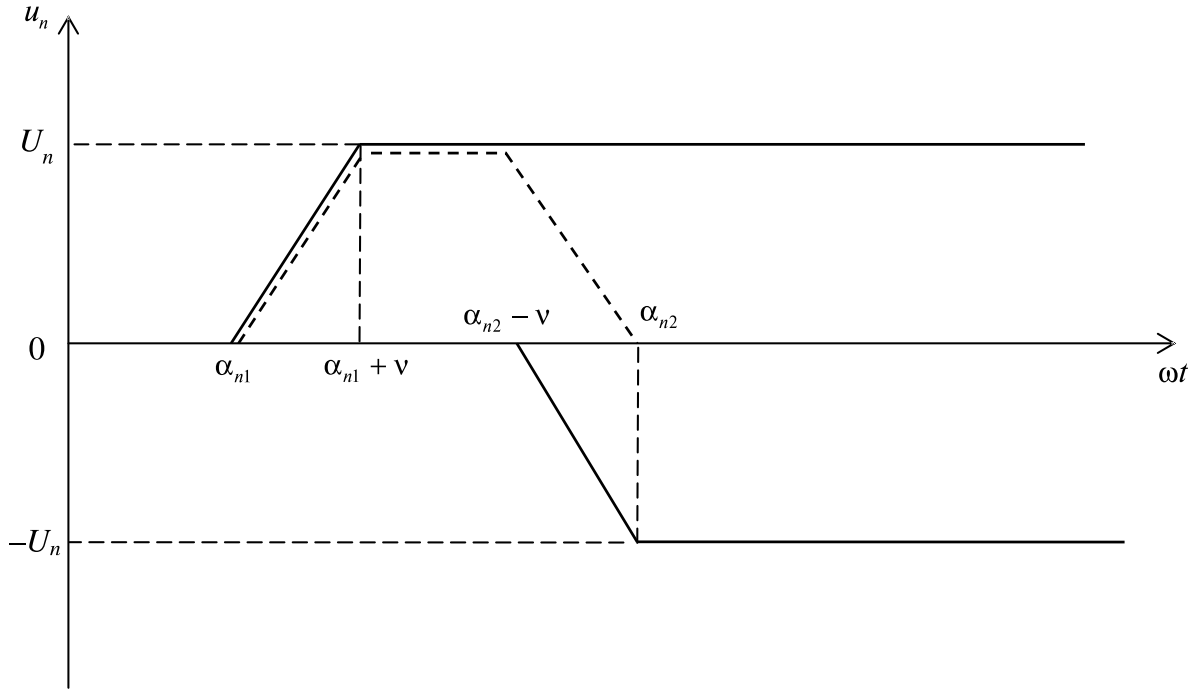


Рис. 2. Эквивалентное представление n -й ступени напряжения u с угловой длительностью фронта v в виде суперпозиции двух скачков напряжения противоположной полярности

С учетом (1), (2) ток в антенне РПДУ окончательно может быть представлен в виде

$$i_A(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} [i'_n(t - \alpha_{n1} / \omega) - i''_n(t - (\alpha_{n2} / \omega - t_\Phi))], \quad (3)$$

где ток $i'_n(t)$ обусловлен первым слагаемым, стоящим в прямоугольных скобках в (2) (т. е. фронтом импульса напряжения), а ток $i''_n(t)$ — соответственно вторым слагаемым в этом выражении, определяющим спад импульса напряжения $u_n(t)$.

Для вычисления токов $i'_n(t)$ и $i''_n(t)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) воспользуемся математическим аппаратом операционного исчисления. Как известно, изображение преобразованного по Лапласу скачка напряжения положительной полярности амплитудой U_n , длительностью фронта t_Φ , произошедшего в момент времени $t_{n1} = \alpha_{n1} / \omega$, имеет вид [3]:

$$\tilde{u}_n^{(+)}(p) = \frac{U_n / t_\Phi - U_n e^{-pt_\Phi} / t_\Phi}{p^2} e^{-pt_{n1}}. \quad (4)$$

По аналогии с (4) запишем изображе-

ние преобразованного по Лапласу скачка напряжения отрицательной полярности:

$$\tilde{u}_n^{(-)}(p) = -\frac{U_n e^{pt_\Phi} / t_\Phi - U_n / t_\Phi}{p^2} e^{-pt_{n2}}. \quad (5)$$

Суммируя (4) и (5) для всех значений n ($n = 1, 2, \dots, N$), получим выражение в операторной форме для напряжения, действующего на входе антенной системы:

$$\tilde{u}(p) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} U_n [e^{-pt_{n1}} (1 - e^{-pt_\Phi}) + e^{-pt_{n2}} (1 - e^{pt_\Phi})] / t_\Phi p^2. \quad (6)$$

С помощью множителя $(-1)^{n+1}$ учитывается изменение полярности импульсов напряжения.

Будем полагать, как и в [1], что эквивалентная схема замещения антенны, включая согласующую цепь, может быть представлена в виде последовательного контура с элементами L , C и R , сопротивление которой в операторной форме имеет вид:

$$Z(p) = \frac{L}{p} [p + \lambda(1 + \sqrt{1 - 4Q^2})] \times \quad (7)$$

$$\times [p + \lambda(1 - \sqrt{1 - 4Q^2})],$$

где $\lambda = R/2L$, $Q = \sqrt{L/C} / R$ – добротность антенного контура.

С учетом (6), (7) изображение тока, протекающего через антенну, может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_A(p) = & \left(\sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \{ U_n [e^{-pt_{n1}} + e^{-pt_{n2}}] / \right. \\ & / t_\phi p^2 - U_n [e^{-p(t_{n1} + t_\phi)} + \\ & + e^{-p(t_{n2} - t_\phi)}] / t_\phi p^2 \} \} p / \\ & / (L[p + \lambda(1 + \sqrt{1 - 4Q^2})] \times \\ & \times [p + \lambda(1 - \sqrt{1 - 4Q^2})]). \end{aligned} \quad (8)$$

Для нахождения оригинала тока антенны $i_A(t)$ по его изображению $\tilde{i}_A(p)$, рассмотрим одно из слагаемых, входящих в состав (8):

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{An}(p) = & (U_n - U_n e^{-pt_\phi}) p / \\ & / (L t_\phi p^2 [p + \lambda(1 + \sqrt{1 - 4Q^2})] \times \\ & \times [p + \lambda(1 - \sqrt{1 - 4Q^2})]). \end{aligned} \quad (9)$$

В последнем выражении опущен из рассмотрения множитель $(-1)^{n+1}$, посредством которого задается полярность импульса тока, а также экспоненциальные члены вида $e^{-pt_{n1}}$ и $e^{-pt_{n2}}$, которые будут учтены в оригинале тока антенны в виде соответствующих временных сдвигов.

Изображению функции $\tilde{i}_{An}(p)$ с учетом таблицы обратных преобразований Лапласа [3] соответствует оригинал

$$\begin{aligned} i_{An}(t) = & \frac{U_n}{\omega t_\phi Q R} \times \\ & \times \left[e^{-\lambda(t-t_\phi)} \left(\frac{(e^{j\lambda(t-t_\phi)\sigma} - e^{-j\lambda(t-t_\phi)\sigma})}{2j\sigma} + \right. \right. \\ & + \left. \frac{(e^{-j\lambda(t-t_\phi)\sigma} + e^{j\lambda(t-t_\phi)\sigma})}{2} \right) - \\ & - e^{-\lambda t} \left(\frac{(e^{j\lambda t\sigma} - e^{-j\lambda t\sigma})}{2j\sigma} + \frac{(e^{-j\lambda t\sigma} + e^{j\lambda t\sigma})}{2} \right) \Big], \end{aligned} \quad (10)$$

где j – мнимая единица, $\sigma = \sqrt{4Q^2 - 1}$.

При выводе выражения (10) было

учтено, что для применяемых на практике антенных систем выполняется условие $Q > 0,5$.

Переходя к вещественной нормированной форме записи в (10) получим:

$$\tilde{i}_{An}(t - t_{n1}) = \begin{cases} \frac{\tilde{U}_n}{\omega t_\phi Q} e^{-\lambda(t-t_{n1})} \times \\ \times \left\{ e^{\lambda t_\phi} \left[\frac{\sin(\varepsilon_{1\phi})}{\sigma} + \cos(\varepsilon_{1\phi}) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{\sin(\varepsilon_1)}{\sigma} + \cos(\varepsilon_1) \right] \right\}, \text{ при } t \geq t_{n1} \\ 0, \text{ при } t \leq t_{n1} \end{cases} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \lambda\sigma(t - t_{n1}), \\ \varepsilon_{1\phi} &= \lambda\sigma(t - t_{n1} - t_\phi), \\ \tilde{u}_n &= \frac{U_n}{U_{\max}} = \frac{U_n}{|i_A(\omega t)|_{\text{импмакс}}} R, \\ \tilde{i}_{An}(t - t_{n1}) &= \frac{i_{An}(t - t_{n1})}{|i_A(\omega t)|_{\text{импмакс}}}, \end{aligned}$$

$$\tilde{i}_{An}(t - t_{n2}) = \frac{i_{An}(t - t_{n2})}{|i_A(\omega t)|_{\text{импмакс}}}, \quad |i_A(\omega t)|_{\text{импмакс}} -$$

максимальное значение тока в антенне.

Ток, протекающий в антенне под воздействием отрицательного перепада напряжения:

$$\tilde{i}_{An}(t - t_{n2}) = \begin{cases} -\frac{\tilde{U}_n}{\omega t_\phi Q} e^{-\lambda(t-t_{n2})} \times \\ \times \left\{ e^{-\lambda t_\phi} \left[\frac{\sin(\varepsilon_{2\phi})}{\sigma} + \cos(\varepsilon_{2\phi}) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{\sin(\varepsilon_2)}{\sigma} + \cos(\varepsilon_2) \right] \right\}, \text{ } t \geq t_{n2} \\ 0, \text{ } t \leq t_{n2} \end{cases} \quad (12)$$

где $\varepsilon_2 = \lambda\sigma(t - t_{n2})$, $\varepsilon_{2\phi} = \lambda\sigma(t - t_{n2} + t_\phi)$.

Используя выражения (3), (11) и (12), можно определить ток, протекающий в антенне РПУ на произвольном временном интервале.

Проверка выражений (11), (12) с помощью предельного перехода $\omega t_\phi \rightarrow 0$ приводит к выражениям, справедливым для

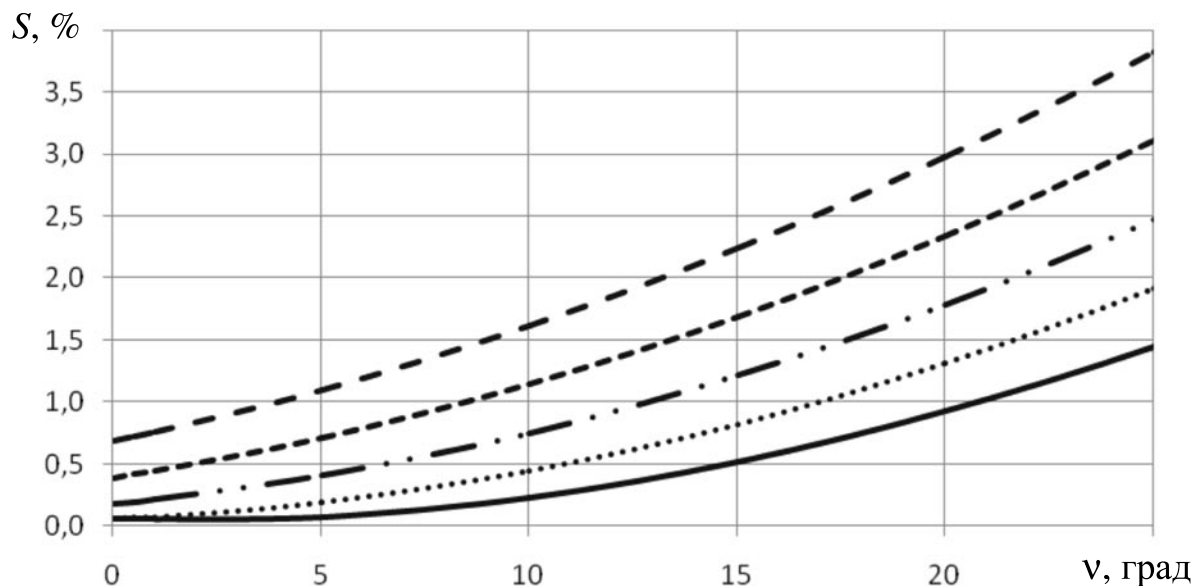


Рис. 3. Зависимость S от длительности интервала коммутации ключевых приборов
(---) $\gamma = 10,0^\circ$; (- - -) $\gamma = 7,5^\circ$; (— • —) $\gamma = 5,0^\circ$; (•••••) $\gamma = 2,5^\circ$; (—) $\gamma = 0,0^\circ$

идеализированных безынерционных ключей [1].

Результаты моделирования

Полученные выше соотношения позволяют количественно определить степень влияния инерционности ключевых приборов на искажение радиосигналов в усилителе мощности РПДУ. В качестве примера оценим вклад инерционности ключевых приборов в искажение сигналов, формируемых в радиопередающем устройстве навигационной системы длинноволнового диапазона. Данный случай интересен тем, что в системах такого типа к усилителю мощности РПДУ предъявляются жесткие требования по точности формирования огибающей радиоимпульсов. В частности, среднеквадратическое отклонение (СКО) S амплитуд первых восьми полуволн тока антенны от их эталонных значений не должно превышать 1 % [4, 5]. При этом следует учесть, что поскольку результирующее искажение обусловлено не одним, а целым рядом факторов, то допустимый вклад инерционности ключевых приборов в искажение сигналов как одного из этих факторов, как правило,

не должен превышать нескольких десятых долей процента.

На рис. 3 представлены зависимости S как функция параметра ν при различных значениях углов регулирования γ_{nk} . Для удобства угловые координаты ступеней α_{nk} представлены в виде отклонений от углов, кратных $n\pi$, где $n = 1, 2, \dots$:

$$\alpha_{nk} = \begin{cases} (n-1)\pi + \gamma_{nk}, & k = 1 \\ n\pi - \gamma_{nk}, & k = 2 \end{cases}$$

В расчете полагалось, что величины отклонений от углов (γ_{nk}) одинаковы. Анализ этих зависимостей показал, что наименее заметно влияние инерционности ключевых приборов проявляется в случае, когда регулирование ширины импульсов отсутствует, т. е. в первом приближении можно считать, что напряжение на выходе КГ имеет форму «меандр». В частности, если принять, что допустимое значение $S \leq 0,25\%$, то, как следует из нижней кривой, приведенной на рис. 3, параметр ν может достигать значения 10° . Отсюда следует, что инерционностью ключевых приборов можно пренебречь, если относительная длительность фронта (спада) ключевого прибора не превышает



$$t_{\phi} / T \leq 2,8 \, \%$$

При сужении выходных импульсов напряжения более чем на 5° влияние инерционности ключевых приборов на искажение генерируемого сигнала становится более заметным. В этом случае применение при оценке искажений сигналов соотношений, полученных в [1], уже не гарантирует требуемой точности. Что же касается влияния инерционности ключей на фазу высокочастотного заполнения радиосигнала, то

оно сказывается значительно слабее. Так, например, при $\nu = 15^\circ$ отклонение точек перехода через ноль тока антенны не превышает 8 нс.

Таким образом, полученные в настоящей работе математические соотношения позволяют учесть вклад инерционности ключевых приборов в искажение генерируемых радиосигналов и сформулировать требования к быстродействию ключей по заданной допустимой величине этих искажений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алексеев, М.А.** Уменьшение искажений при генерировании радиосигналов ключевыми методами [Текст] / М.А. Алексеев, В.А. Сороцкий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — № 3(174). — С. 26–32.
2. **Артым, А.Д.** Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании [Текст] / А.Д. Артым. — М.: Связь, 1980. — 209 с.
3. **Деч, Г.** Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и

Z-преобразования [Текст] / Г. Деч; Пер. с нем. — М.: Наука, Гл. редакция физматлит, 1971. — 288 с.

4. Specification of the Transmitted Loran — C Signal: Commandant Instruction M 16562.4 A [Электронный ресурс] / United States Department of Transportation, United States Coast Guard. — 1994.

5. **ГОСТ Р 53168-2008.** Система радионавигации «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования. — М.: Стандартинформ, 2009. — 21 с.

REFERENCES

1. **Alekseev M.A., Sorockii V.A.** Umen'shenie iskazhenij pri generirovanii radiosignalov klyuchevymi metodami / Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatica. Upravlenie. Telekommunikatsii. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. — № 3(174). — S. 26–32. (rus)
2. **Artym A.D.** Usiliteli klassa D i klyuchevye generatory v radiosvjazi i radioveshhanii. — Moscow: Svjaz', 1980. — 209 s. (rus)
3. **Dech G.** Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniju preobrazovanija Laplasy i

Z-preobrazovanija; Per. s nem. — Moscow: Nauka, Gl. redakcija fizmatlit, 1971. — 288 s. (rus)

4. Specification of the Transmitted Loran — C Signal: Commandant Instruction M 16562.4 A / United States Department of Transportation, United States Coast Guard. — 1994.

5. **GOST R 53168-2008.** Sistema radionavigacii «Chajka». Signaly peredajushhikh stancij. Tehnicheskie trebovania. — Moscow: Standartinform, 2009. — 21 s. (rus)

СЕМАКОВ Никита Владимирович — студент кафедры радиотехники и телекоммуникации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: lanfren2@gmail.com

SEMAKOV, Nikita V. St. Petersburg State Polytechnical University .

195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: lanfren2@gmail.com

СОРОЦКИЙ Владимир Александрович — *заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru

SOROTSKY, Vladimir A. *St. Petersburg State Polytechnical University .*
195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru

УДК 004.01:519.8:65.01

Г.Я. Маркелов

МЕТОД СЦЕНАРИЕВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

G.Ya. Markelov

METHOD OF SCENARIOS IN THE MANAGEMENT OF REAL TIME

Представлены результаты анализа применения метода сценариев при управлении в реальном времени. Показаны задачи, возникающие при применении метода сценариев и направления их решения. Получены оценки качества управления по методу сценариев и условия, позволяющие упростить решение задачи кластеризации. Результаты работы могут быть полезны разработчикам систем управления с большим числом состояний объекта управления.

МЕТОД СЦЕНАРИЕВ. КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ.

The results of the analysis of the use of scenarios in the management of real-time. Showing the problems arising from the application of scenarios and the direction of their solutions. Estimates are obtained by the method of quality control scenarios and conditions to simplify the solution of the problem of clustering. The results may be useful to developers of control systems with a large number of states of the object management.

METHOD SCENARIOS. CLUSTERING OF THE STATE SPACE.

Системы управления реального времени должны обеспечивать обработку информации и формирование управляющих воздействий в режиме «on-line», когда на выбор управления отводится ограниченное время, величина которого определяется спецификой объекта управления.

Для подобных систем необходимо минимизировать время обслуживания поступающих запросов на управление. Это может достигаться либо повышением производительности обслуживающих устройств, при сохранении традиционных алгоритмов управления, либо применением других алгоритмов, например, сценарного подхода.

В данном случае сценарий – это заранее предусмотренное управление для конкретного состояния объекта управления. Такой подход отличается от традиционных сценарных подходов к управлению, когда сценарий является прогнозом развития объек-

та управления при различных состояниях и управлениях [1, 5].

Предложенный подход хорошо применим к робастным системам, а также согласуется с принципами модельного прогнозирующего управления [2, 3].

Описание объекта управления

Состояние объекта управления задается вектором $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_R)$, где s_j – значение j -го параметра состояния ($0 \leq s_j < \infty$), R – размерность пространства состояний ($1 \leq R < \infty$). Множество состояний объекта (пространство состояний) $\mathbf{S} = (\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{\bar{N}})$ конечно и их число равно $\bar{N}$ ($0 < \bar{N} < \infty$). Состояние номер m задается вектором $\mathbf{s}_m = (s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mR})$. При этом каждый j -й параметр состояния имеет конечное множество значений $(s_{mj_1}, s_{mj_2}, \dots, s_{mj_{N_j}})$, $0 < N_j < \infty$ и $\sum_{j=1}^R N_j = \bar{N}$.

Если объект управления и его состояния рассматриваются в дискретные моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_K, \dots$, такие, что $t_m > t_n$ если $m > n$, то состояние объекта в момент t_k задается вектором $\mathbf{s}(t_k) = (s_1(t_k), s_2(t_k), \dots, s_R(t_k))$. Конкретное состояние номер r задается вектором $\mathbf{s}_r(t_k) = (s_{r1}(t_k), s_{r2}(t_k), \dots, s_{rR}(t_k))$, где $s_{rj}(t_k)$ – значение j -го параметра состояния, $\mathbf{s}_m(t_k) \in \mathbf{S}$ и $\mathbf{s}_m(t_k) = \mathbf{s}_m$ для любого $t_0, t_1, \dots, t_K, \dots$ и для любого m .

Задано конечное множество возможных управлений – $\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_M)$, где $\mathbf{u}_j = (u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{jR})$ – вектор управления номер j ($j = 1, 2, \dots, M$), M – число возможных управлений, u_{jk} – значение k -го параметра вектора управления. Каждый k -й параметр управления номер j имеет конечное множество значений $(u_{jk_1}, u_{jk_2}, \dots, u_{jk_{M_k}})$, $0 < M_k < \infty$ и $\sum_{k=1}^R M_k = M$.

Управление в момент t_k – $\mathbf{u}(t_k)$ или $\mathbf{u}(\mathbf{s}(t_k))$, если объект находится в состоянии $\mathbf{s}(t_k)$, если управление $\mathbf{u}_j$ применяется в момент t_k , то это $\mathbf{u}(t_k) = \mathbf{u}_j(t_k)$ или $\mathbf{u}_j(t_k)$. Если управление применяется к объекту, находящемуся в состоянии $\mathbf{s}_m$, то это будем обозначать $\mathbf{u}(\mathbf{s}_m)$ или $\mathbf{u}(\mathbf{s}_m(t_k))$ для момента t_k , если известно, что это управление $\mathbf{u}_j$, то $\mathbf{u}_j(\mathbf{s}_m)$ или $\mathbf{u}_j(\mathbf{s}_m(t_k))$.

Величина $z_k = (t_{k+1} - t_k)$ – k -й шаг управления. В общем случае шаги управления могут иметь различные значения.

Определение 1. Расстояние между двумя состояниями объекта $\mathbf{s}_m, \mathbf{s}_n$ есть величина $r(\mathbf{s}_m, \mathbf{s}_n) = \sum_{k=1}^R a_i |s_{mk} - s_{nk}|$, где a_i ($0 \leq a_i < \infty$) – весовые коэффициенты, учитывающие вес конкретных параметров состояния.

Определение 2. Расстояние между двумя управлениями $\mathbf{u}_j$ и $\mathbf{u}_m$ есть величина $r(\mathbf{u}_j, \mathbf{u}_m) = \sum_{i=1}^R b_i |u_{ji} - u_{mi}|$, где b_i ($0 \leq b_i < \infty$) – весовые коэффициенты, учитывающие вес конкретных параметров управления.

Функция изменения состояния объекта при воздействии на него управления в момент t_k $\mathbf{s}(t_{k+1}) = W(\mathbf{s}(t_k), \mathbf{u}(\mathbf{s}(t_k)))$.

На практике часто бывает, что объект управляется на заданном интервале времени (t_0, t_n) , при этом множество управле-

ний на данном интервале $\mathbf{U}(t_0, t_n) = (\mathbf{u}(t_0), \mathbf{u}(t_1), \dots, \mathbf{u}(t_n)) = (\mathbf{u}(\mathbf{s}(t_0)), \mathbf{u}(\mathbf{s}(t_1)), \dots, \mathbf{u}(\mathbf{s}(t_n)))$ и множество состояний объекта на данном интервале $\mathbf{W}(\mathbf{U}(t_0, t_n)) = (\mathbf{s}(t_0), W(\mathbf{s}(t_0), \mathbf{u}(\mathbf{s}(t_0))), \dots, W(\mathbf{s}(t_{n-1}), \mathbf{u}(\mathbf{s}(t_{n-1}))))$.

Функционал, позволяющий количественно оценивать эффективность управления на заданном интервале времени (t_0, t_n) , имеет вид:

$$L(t_0, t_n, \mathbf{U}(t_0, t_n), \mathbf{W}(\mathbf{U}(t_0, t_n))) = \sum_{k=1}^n G(\mathbf{u}(t_k), \mathbf{s}(t_k), t_k),$$

где $\mathbf{u}(t_k) \in \mathbf{U}$, ($k = 1, 2, \dots, n$); $G(\mathbf{u}(t_k), \mathbf{s}(t_k), t_k)$ – функция для вычисления эффективности управления (функция эффективности управления) $\mathbf{u}(t_k)$ при нахождении объекта в состоянии $\mathbf{s}(t_k)$ в момент t_k и переходе в состояние $\mathbf{s}(t_{k+1})$ за шаг управления.

Определение 3. Управления $\mathbf{u}_j$ и $\mathbf{u}_m$ ($j \neq m$) называются h -эквивалентными для состояния $\mathbf{s}(t_k)$, если $|G(\mathbf{u}_j(t_k), \mathbf{s}(t_k), t_k) - G(\mathbf{u}_m(t_k), \mathbf{s}(t_k), t_k)| = h$ для любых t_k ($k = 1, 2, \dots, n$).

Определение 4. (Свойство монотонности управления). Управление $\mathbf{u}(\mathbf{s}(t_k)) \in \mathbf{U}$ называется монотонным, на множестве состояний объекта $\mathbf{S}$, если для любых состояний $\mathbf{s}_m \in \mathbf{S}$, $\mathbf{s}_n \in \mathbf{S}$, $\mathbf{s}_r \in \mathbf{S}$ и любого момента времени t_k ($k = 0, 1, \dots, n$), при выполнении условия $r(\mathbf{s}_m(t_k), \mathbf{s}_n(t_k)) \leq r(\mathbf{s}_m(t_k), \mathbf{s}_r(t_k))$, следует:

$$|G(\mathbf{u}(t_k), \mathbf{s}_m(t_k), t_k) - G(\mathbf{u}(t_k), \mathbf{s}_n(t_k), t_k)| \leq |G(\mathbf{u}(t_k), \mathbf{s}_m(t_k), t_k) - G(\mathbf{u}(t_k), \mathbf{s}_r(t_k), t_k)|.$$

Задача управления на интервале (t_0, t_n) заключается в нахождении множества управлений $\mathbf{U}^*(t_0, t_n) = (\mathbf{u}^*(t_1), \mathbf{u}^*(t_2), \dots, \mathbf{u}^*(t_n))$, где $\mathbf{u}^*(t_k) \in \mathbf{U}$, ($k = 1, 2, \dots, n$) такого, что

$$L(t_0, t_n, \mathbf{U}^*(t_0, t_n), \mathbf{W}(\mathbf{U}^*(t_0, t_n))) \leq L(t_0, t_n, \mathbf{U}(t_0, t_n), \mathbf{W}(\mathbf{U}(t_0, t_n)))$$

при $\mathbf{U}^*(t_0, t_n) \neq \mathbf{U}(t_0, t_n)$
или

$$\sum_{k=1}^n G(\mathbf{u}^*(t_k), \mathbf{s}(t_k), t_k) \leq \sum_{k=1}^n G(\mathbf{u}(t_k), \mathbf{s}(t_k), t_k)$$

при $\mathbf{U}^*(t_0, t_n) \neq \mathbf{U}(t_0, t_n)$.



Данная задача является классической задачей теории оптимального управления и принципиально может решаться при конечном множестве состояний объекта управления, например, с применением динамического программирования [6].

Метод сценариев

Во многих случаях реальное число возможных состояний объекта управления $\bar{N}$ очень велико, что приводит к высокой трудоемкости вычисления оптимальных управлений, и классический подход часто непригоден для практического применения, особенно при управлении в реальном времени (при малых значениях шагов управления).

В связи с этим для подобных случаев предлагается применять метод сценариев (сценарный подход) [1].

Метод основан на создании множества сценариев управления (каталога сценариев), заранее определенных для различных состояний объекта. Это множество, как правило, значительно меньше множества состояний объекта.

Каждый сценарий для момента времени t_k содержит информацию о состоянии объекта управления, оптимальном для этого состояния управления и длительности шага управления — $c(s(t_k), u^*(s(t_k)), z_k)$. Отметим, что в общем случае сценарий для момента t_k реализуется на интервале времени (t_k, t_{k+1}) ($k = 0, 1, \dots, n-1$), и параметры оптимального управления могут иметь различные моменты времени реализации на интервале (t_k, t_{k+1}) .

Такой подход позволяет заменить трудоемкие вычислительные процедуры нахождения оптимального управления более простыми и быстрыми, связанными с поиском требуемого сценария из каталога сценариев.

Особенность данного подхода заключается в необходимости создания сценариев и оценки точности при выборе управления, поскольку реальное состояние объекта управления не всегда может соответствовать его состоянию по сценарию из-за ограни-

ченности числа сценариев по сравнению с реальным множеством состояний объекта.

Итак, пусть имеется конечное пространство базовых состояний объекта, подготовленное для применения метода сценариев — $S_0 \subseteq S$, где $S_0 = (s_{01}, s_{02}, \dots, s_{0N})$, где $s_{0i} = (s_{0i1}, s_{0i2}, \dots, s_{0iR})$ — вектор i -го базового состояния объекта такой, что $s_{0i} \in S$ и $N < \bar{N}$.

Объект функционирует на интервале (t_0, t_n) , и для каждого базового состояния $s_{0i}(t_k)$ в этом случае определяется оптимальное управление $u_0^*(s_{0i}(t_k)) \in U$ так, что создается множество оптимальных управлений

$$U_0^*(t_0, t_n) = \{(u_0^*(s_{01}(t_0)), u_0^*(s_{02}(t_0)), \dots, \\ \dots, u_0^*(s_{0N}(t_0))), (u_0^*(s_{01}(t_1)), u_0^*(s_{02}(t_1)), \dots, \\ u_0^*(s_{0N}(t_1))), \dots, (u_0^*(s_{01}(t_n)), u_0^*(s_{02}(t_n)), \dots, \\ \dots, u_0^*(s_{0N}(t_n)))\}.$$

Функция изменения состояния объекта при воздействии на него управления имеет вид $s_0(t_{k+1}) = W_0(s_0(t_k), u_0^*(s_0(t_k)))$, здесь $s_0(t_k) \in S_0$ для всех $k = 0, 1, \dots, n$.

Множество оптимальных управлений удовлетворяет условию

$$L(t_0, t_n, U_0^*(t_0, t_n), W_0(U_0^*(t_0, t_n))) \leq \\ \leq L(t_0, t_n, U(t_0, t_n), W_0(U(t_0, t_n)))$$

при $U_0^*(t_0, t_n) \neq U(t_0, t_n)$
или

$$\sum_{k=1}^n G(u_0^*(t_k), s_0(t_k), t_k) \leq \sum_{k=1}^n G(u(t_k), s_0(t_k), t_k)$$

при $U_0^*(t_0, t_n) \neq U(t_0, t_n)$.

В этом случае задача оптимального управления на заданном интервале (t_0, t_n) решается как задача нахождения оптимальных управлений для множества состояний объекта на интервале — $S_0(t_0, t_n)$.

Эффективность управления вычисляется по формуле

$$L(t_0, t_n, U_0^*(t_0, t_n)) = \\ = \sum_{k=1}^n G(u_0^*(s_{0m_k}(t_k)), s_{0m_k}(t_k), t_k).$$

Применение данного подхода требует решения следующих задач:

1. Формирование конечного мно-

жества состояний объекта управления $S_0 = (s_{01}, s_{02}, \dots, s_{0N})$ или кластеризация пространства состояний.

2. Вычисление оптимального управления для каждого состояния из множества S_0 , т. е. формирование множества $U_0 = (u_0^*(s_{01}), u_0^*(s_{02}), \dots, u_0^*(s_{0N}))$.

3. Определение величины погрешности управления по сравнению с классическим управлением на всем множестве состояний.

Кластеризация пространства состояний

Как отмечалось, применение метода сценариев требует построения конечного множества состояний объекта управления, где одно состояние может соответствовать группе (подмножеству) реальных состояний. Далее будем считать, что управления не зависят от момента времени, а значение функции эффективности управления зависит только от состояния объекта и принимаемого в этом состоянии управления.

В этом случае пространство состояний $S = (s_1, s_2, \dots)$ разбивается на подмножества $S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0N}$ так, что $S = \bigcup_{j=1}^N S_{0j}$, $S_{0m} \cap S_{0n} = \emptyset$ для всех $m \neq n$. Каждому подмножеству S_{0j} ставится в соответствие базовое состояние s_{0j} , где $s_{0j} = s_{k_j}$ и $s_{k_j} \in S$; здесь k_j — номер состояния из множества S . Таким образом, может быть сформировано базовое множество $S_0 = (s_{01}, s_{02}, \dots, s_{0N}) = (s_{k_1}, s_{k_2}, \dots, s_{k_N})$.

Задачу формирования подмножеств базовых состояний можно рассматривать как задачу кластеризации [4]. Однако в данном случае для того, чтобы кластеризация была возможна для заданного значения числа базовых состояний N , необходимо определить правила назначения констант кластеризации.

Разработан и теоретически обоснован алгоритм формирования множества базовых состояний (алгоритм кластеризации), включающий следующие основные шаги.

1. Выбирается N базовых состояний объекта, для которых оптимальные управления различны: $s_{k_1}, s_{k_2}, \dots, s_{k_N}$.

2. Для каждого базового состояния

s_{0k_j} вычисляется оптимальное управление $u_0^*(s_{0k_j}) = u_{0k_j}^*$ и формируется множество $U_0 = (u_{0k_1}^*, u_{0k_2}^*, \dots, u_{0k_N}^*)$.

3. Для каждого базового состояния s_{0k_j} формируется подмножество (кластер) S_{0j} по правилу:

- $s_k \in S_{0j}$, если оптимальные управления $u_0^*(s_{0k_j})$ и $u^*(s_k)$ h -эквивалентны, то есть

$$|G(u_0^*(s_{0k_j}), s_{0k_j}) - G(u^*(s_k), s_k)| = h,$$

где $h \leq H_{0j}$ ($j = 1, 2, \dots, N$); $\infty > H_{0j} > 0$ ($j = 1, 2, \dots, N$) — предварительно заданная константа кластеризации;

- если существует s_{0k_m} ($m \neq j$) такое, что одновременно выполняются условия:

$$|G(u_0^*(s_{0k_j}), s_{0k_j}) - G(u^*(s_k), s_k)| = h,$$

где $h \leq H_{0j}$ и

$$|G(u_0^*(s_{0k_m}), s_{0k_m}) - G(u^*(s_k), s_k)| = g,$$

где $g \leq H_{0m}$, то $s_k \in S_{0j}$, если $j < m$ и $s_k \in S_{0m}$, если $j > m$.

Для всех состояний любого подмножества S_{0j} существует одно управление — $u^*(s_{0k_j}) = u_{0k_j}^*$.

Качество кластеризации

Поскольку оптимальное управление для базового состояния применяется для всех состояний, входящих в подмножество этого базового состояния, то, естественно, качество управления отличается от того, когда для каждого состояния выбирается оптимальное управление (полностью оптимальное управление). Разницу между оптимальным управлением при применении метода сценариев с кластеризацией и классическим оптимальным управлением можно оценить, используя понятие h -эквивалентности управлений и правила кластеризации.

Для любого состояния s_k из подмножества S_{0j} выполняется неравенство:

$$|G(u^*(s_{0k_j}), s_{0k_j}) - G(u^*(s_k), s_k)| \leq H_{0j},$$

$$j = 1, 2, \dots, N.$$

Следовательно, оценка $E(S, S_0, N, U_0^*, U^*)$ разницы между полностью оптимальным



управлением и управлением при применении метода сценариев может быть вычислена по формуле

$$E(S, S_0, N, U_0^*, U^*) \leq \sum_{j=1}^N H_{oj}.$$

В случае конечного числа состояний объекта задача формирования множества $S_0 = (s_{0k_1}, s_{0k_2}, \dots, s_{0k_N})$ и множества $U_0^* = (u^*(s_{0k_1}), u^*(s_{0k_2}), \dots, u^*(s_{0k_N}))$ решается путем перебора конечного множества вариантов.

Для монотонного управления получен следующий полезный результат.

Утверждение. Пусть множество управлений U содержит монотонные управления, тогда

• если состояние s_k отнесено к подмножеству S_{0j} и

$$r(s_{0k_j}, s_k) = \sum_{r=1}^R |s_{0k_j, r} - s_{kr}|,$$

то к подмножеству S_{0j} относится любое состояние s_m для которого $r(s_{0k_j}^0, s_m) \leq r(s_{0k_j}, s_k)$;

• если состояние s_n не отнесено к подмножеству S_{0j} , то к подмножеству S_{0j} не относится любое состояние s_m , для которого $r(s_{0k_j}, s_m) \geq r(s_{0k_j}, s_n)$.

Этот результат позволяет более просто формировать подмножества, поскольку не нужно вычислять величину h -эквивалентности для всех проверяемых состояний объекта.

Предложен и исследован подход к управлению объектами в реальном времени, основанный на применении сценариев как готовых решений для управления на заданном множестве состояний объекта управления.

Исследования предложенного подхода позволили разработать алгоритм кластеризации, обеспечивающий формирование заданного множества базовых состояний объекта, получить оценку качества управления с применением сценариев по сравнению с классическим управлением на всем множестве состояний объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимова, О.Е. Сущность, формы и особенности сценарного подхода в современном управлении: Дис. ... канд. соц. наук; 22.00.08 [Текст] / О.Е. Акимова. — М., 2006. — 143 с. — РГБ ОД, 61 06-22/528.
2. Гудвин, Г.К. Проектирование систем управления [Текст] / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. — 911 с.
3. Дорф, Р. Современные системы управления [Текст] / Р. Дорф, Р. Бишоп. — М.: Лабо-

тория базовых знаний, 2002. — 832 с.

4. Жамбю, М. Иерархический кластер-анализ и соответствия [Текст] / М. Жамбю. — М.: Финансы и статистика, 1988. — 345 с.
5. Литвак, Б.Г. Управленческие решения [Текст] / Б.Г. Литвак. — М.: ТАНДЕМ, ЭКМОС, 1998. — 128 с.
6. Петров, Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления [Текст] / Ю.П. Петров; Изд. 2-е, перераб. и доп. — Л.: Энергия, 1977. — 280 с.

REFERENCES

1. Akimova O.E. Sushchnost', formy i osobennosti stsennarnogo podkhoda v sovremennom upravlenii: Dis. ... kand. sots. nauk; 22.00.08. — Moscow, 2006. — 143 s. — RGB OD, 61 06-22/528. (rus)
2. Gudvin G.K., Grebe S.F., Sal'gado M.E. Proektirovanie sistem upravleniya. — Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2004. — 911 s. (rus)
3. Dorf R., Bishop R. Sovremennye sistemy upravleniya. — Moscow: Laboratoriya bazovykh

znaniy, 2002. — 832 s. (rus)

4. Zhambyu M. Ierarkhicheskiy klaster-analiz i sootvetstviya. — Moscow: Finansy i statistika, 1988. — 345 s. (rus)
5. Litvak B.G. Upravlencheskie resheniya. — Moscow: TANDEM, EKMOS, 1998. — 128 s. (rus)
6. Petrov Yu.P. Variatsionnye metody teorii optimal'nogo upravleniya; Izd. 2-e, pererab. i dop. — Leningrad: Energiya, 1977. — 280 s. (rus)

МАРКЕЛОВ Геннадий Яковлевич — преподаватель кафедры вычислительной техники Тихоокеанского государственного университета.

680035, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 136.

E-mail: teledv@inbox.ru

MARKELOV, Gennadii Ya. *Pacific National University.*

680035, Tikhookeanskaya Str. 136, Khabarovsk, Russia.

E-mail: teledv@inbox.ru



Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

УДК 681.3.06

И.Г. Черноруцкий

ПЕТЕРБУРГСКАЯ НАУЧНАЯ ШКОЛА ЖЕСТКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ (история и обзор основных научных результатов)

I.G. Chernorutskiy

ST. PETERSBURG SCIENTIFIC SCHOOL OF STIFF OPTIMIZATION (history and review of main scientific results)

Дан краткий экскурс в историю развития теории жесткой оптимизации в работах ученых петербургской (ленинградской) школы. Показано, что основные результаты вытекают из общей теории жестких динамических систем. Приведены основные результаты в области решения жестких задач математического программирования.

ЖЕСТКИЕ СИСТЕМЫ (STIFF). ЖЕСТКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Brief description of history of development of stiff optimization problem decision by St. Petersburg (Leningrad) school is presented. It is established that main results are derived from basic theory of stiff dynamic systems. Main results of mathematical programming of stiff problems are stated.

STIFF SYSTEMS. STIFF OPTIMIZATION. MATHEMATICAL PROGRAMMING. NUMERICAL METHODS. COMPUTER SIMULATION.

Проблема жесткости в компьютерном моделировании — достаточно общая. В данной статье основное внимание уделяется *жестким задачам математического программирования*. В теории конечномерной оптимизации (математического программирования) уже давно появились термины «овраг» или (в англоязычной литературе) «гребень», «долина». Они всегда связывались с геометрией поверхностей отклика минимизируемых (максимизируемых) функционалов и с соответствующими вычислительными трудностями.

В настоящее время уже трудно установить, когда впервые было указано на явление овражности (жесткости), как на типичную практическую ситуацию, затрудняющую работу классических оптимизирующих процедур. Во всяком случае, уже в

начале компьютерной эры в 1959 г. в фундаментальном труде А.А. Фельдбаума «Вычислительные устройства в автоматических системах» были, по существу, рассмотрены все основные признаки овражной ситуации, включая явление «заклинивания» (что соответствует англоязычному термину jamming) и понятие многомерного дна оврага. Широкую известность проблема овражности приобрела после работ И.М. Гельфанда и М.Л. Цетлина (1961–1962), посвященных методам управления техническими системами и применению поисковых процедур в системах автоматической оптимизации. Эти исследования привели к созданию известного «метода оврагов». В 1967 г. Л.А. Растринин обобщил метод оврагов на общий случай овражной ситуации, когда размерность дна оврага может

превышать единицу. Следующий шаг в изучении проблемы был предпринят в монографии Л.А. Растригина «Системы экстремального управления» (1974), где в связи с общими вопросами применения поисковых методов параметрической оптимизации в системах экстремального управления рассмотрены различные аспекты овражной ситуации и, в частности, построены простейшие модели овражных экстремальных объектов. Соответствующие вопросы явно или неявно обсуждались и в работах зарубежных авторов (Д. Химмельблау, М. Бокс, Д. Уайлд, Р. Брент и др.).

Существенный вклад в теорию *жесткой оптимизации* внесли публикации 1977–1979 гг. научной группы, возглавляемой профессором Ю.В. Ракитским, в которых впервые начало развиваться научное направление, связанное с изучением общей проблемы жесткости в задачах численного моделирования. Позже появились работы, целиком посвященные проблеме жесткости в задачах математического программирования [1–15]. В этих работах показано, что с вычислительной точки зрения основные оптимизационные проблемы определяются специальной формой плохой обусловленности, тесно связанной с известной концепцией жесткости систем обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих траектории наискорейшего спуска гладких минимизируемых функционалов. Поэтому и употребляются термины «жесткая оптимизация», «жесткие функционалы» и т. п.

Исторически регулярные исследования по теории жесткой оптимизации берут свое начало с опубликованной в издательстве «Наука» в 1979 г. пионерской монографии [4]. Ей предшествовала важная небольшая книга [5] из области компьютерного моделирования, где были обозначены основные проблемы теории жестких систем и пути их разрешения.

В этих работах впервые была разработана общая теория систем, описываемых жесткими дифференциальными моделями, включающая асимптотическую теорию жестких систем и основы теории минимизации жестких функционалов. Собственно

проблемы оптимизации в указанных книгах являлись, если угодно, «вторичными», «подчиненными».

Данные публикации были замечены в научном сообществе и любой серьезный современный учебник по численному анализу и компьютерному моделированию содержит обязательные ссылки на эти работы. Научным редактором и инициатором издания монографии [4] в издательстве «Наука» являлся крупный ученый и известный автор учебников по численным методам академик РАН Н.С. Бахвалов.

Несмотря на важность полученных и опубликованных к 1980 г. результатов, проблема ими не исчерпывалась. Необходимо было развивать «оптимизационную часть». Оставался нерешенным целый ряд существенных вопросов, связанных с развитием отдельного направления – теории жестких оптимизационных задач, а также общих принципов построения методов и алгоритмов параметрической оптимизации по жестким целевым функционалам. Кроме того, представляла практический интерес разработка проблемно-ориентированного алгоритмического и программного обеспечения, учитывавшего специфику отдельных классов задач и структурные особенности применяемых критериев качества. При построении таких методов и алгоритмов должны были учитываться такие естественные для приложений сопутствующие факторы сложности, как невыпуклость минимизируемых функционалов, их негладкость, а в ряде случаев и высокая размерность вектора варьируемых параметров. Такие исследования были проведены и были получены значительные для теории и практики результаты. Таким образом, стало возможным говорить о формировании еще одного нового научного направления компьютерного моделирования, связанного с исследованием проблем жесткой оптимизации. Это направление в основном развивалось силами петербургской школы жесткой оптимизации.

Полученные результаты нашли отражение в докторской диссертации И.Г. Черно-руцкого [8], а также в монографии [9], изданной в том же году.



По результатам дальнейшего развития основных положений нового научного направления были выпущены книги [10, 13]. Монографическое издание [13] позиционируется также как современное учебное пособие при подготовке специалистов по компьютерингу (computing). Книга и ее автор являются призерами издательской программы «300 лучших учебников для высшей школы в честь 300-летия основания Санкт-Петербурга».

В указанных работах была создана *теория конечномерной оптимизации по жестким целевым функционалам*. Разработаны новые высокоэффективные автоматизированные программные пакеты для оптимального параметрического синтеза. Разработана теория построения и применения новых классов методов оптимизации. Введено базовое понятие *функции релаксации* для матричных градиентных методов. На ее основе предложены новые методы оптимизации, в т. ч. в пространствах высокой размерности, и доказано их превосходство над существующими методами при решении задач с жесткими функционалами. Разработаны методы *обобщенного покоординатного спуска*.

Были получены существенные результаты и в области *компьютерных систем поддержки принятия решений*. Эти исследования естественным образом опираются на результаты теории жестких систем и теории оптимизации по жестким целевым функционалам. В алгоритмическом плане процедура принятия решения в целом ряде случаев сводится к некоторой цепочке оптимизационных задач, что и позволяет применять соответствующие методы. По результатам этих работ опубликованы монографии [12, 14].

Эти книги также используются как учебные пособия при подготовке студентов в области системного анализа, принятия решений, интеллектуальных и экспертных систем.

В 2011 г. опубликована монография [15], целиком посвященная проблемам компьютерной оптимизации.

В отличие от предыдущих изданий в этой книге присутствует большой раздел по теории оптимизации в общих функциональных пространствах. На основе пред-

ставленного материала теория и методы «жесткой оптимизации», разработанные автором для задач конечномерной оптимизации, могут быть перенесены на задачи, сформулированные для бесконечномерных пространств.

Разработанные трудами ученых петербургской школы теория, методы и алгоритмы конечномерной оптимизации применялись при решении практических задач.

В течение десяти лет Университетом (профессора Ю.В. Ракитский, С.М. Устинов, И.Г. Черноруцкий, доцент В.А. Зимницкий и др.) проводился цикл научных исследований для химической промышленности в интересах предприятия ОНПО «Пластполимер». Основные решаемые задачи были связаны с построением математических моделей процессов полимеризации и химических реакторов (задачи параметрической идентификации) с целью повышения эффективности управления технологическими процессами, а также с оптимизацией действующих промышленных установок по производству полимеризационных материалов. Кроме того, разработанные в результате проводимых исследований теория, методы и алгоритмы позволили успешно решать задачи оптимального проектирования запоминающих устройств на плоских магнитных доменах (профессора Т.К. Кракау и И.Г. Черноруцкий, доцент В.В. Амосов), моделирования артериальной сосудистой системы человека и животных методами электрогидравлических аналогий (профессор И.Г. Черноруцкий, ст. преподаватель Н.Н. Черноруцкая), построения подсистем оптимизации паровых и газовых турбин (профессор И.Г. Черноруцкий) и др.

В разное время и при разных обстоятельствах полученные результаты обсуждались с академиками РАН Н.Н. Моисеевым, Н.С. Бахваловым, К.С. Демирчяном, членом-корреспондентом РАН П.А. Бутыриным, профессорами В.А. Городецким, В.Я. Катковником, А.А. Первозванским, Л.А. Растригиным, Б.В. Пельцвергером (США) и многими другими ведущими учеными в области компьютерной математики и компьютерного моделирования.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ОБЛАСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Проблема плохой обусловленности — жесткости

1. Обоснована необходимость выделения плохо обусловленных (*жестких*) оптимизационных задач в отдельный класс. Эта необходимость объясняется, с одной стороны, значительными вычислительными трудностями при их решении стандартными средствами, а, с другой — экспериментально установленным фактом типичности овражной ситуации для большинства реальных задач.

2. Выявлены и в явном виде сформулированы следующие основные причины появления жестких экстремальных задач:

- частные структурные особенности решаемой задачи, например, некорректность задачи решения уравнения Винера—Хопфа, играющего важную роль во многих разделах общей теории компьютерного моделирования;
- наличие фактора агрегированности аргументов минимизируемого функционала и отсутствие регулярных методов выделения агрегатов;
- жесткость систем обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику нестационарных объектов оптимизации;
- специальные структуры расширенных целевых функционалов, получаемых при учете ограничений методами штрафных функций и модифицированных функций Лагранжа;
- специальные структуры обобщенных целевых функционалов при решении многокритериальных оптимизационных задач на основе линейных и минимаксных (максиминных) сверток.

3. Построено *формальное описание* явления плохой обусловленности, оказывающееся более конструктивным для теории оптимизации по сравнению с общим определением, опирающимся на теорию жестких систем. Введено новое понятие *степени жесткости*, отличное от обычно используемого спектрального числа обусловленности

матрицы Гессе и более точно отражающее возникающие в процессе оптимизации вычислительные трудности. В частности, показано, что из высокой степени жесткости всегда следует плохая обусловленность матрицы Гессе, а обратное, вообще говоря, неверно. Последнее обстоятельство обычно игнорировалось не только в учебной, но и в научной литературе, что не позволяло адекватно оценивать трудность решаемой задачи и эффективность применяемых алгоритмов при минимизации невыпуклых целевых функционалов. Показана *регулярность* введенных формальных моделей жестких функционалов: для случая квадратичных функционалов доказано совпадение «дна оврага» с линейной оболочкой собственных векторов матрицы Гессе, отвечающих «малым» собственным значениям.

4. Разработаны алгоритмические *методы распознавания* овражной ситуации, играющие роль критериев жесткости. Построена процедура, позволяющая по результатам работы метода простого градиентного спуска (ПГС) указать нижнюю границу для степени жесткости минимизируемого функционала, что имеет первостепенное значение при оценке трудности решаемой задачи и при автоматизации процесса выбора алгоритма конечномерной оптимизации. Кроме того, предложена альтернативная методика оценки степени жесткости на основе прямого спектрального разложения матрицы Гессе с учетом погрешностей вычислений. Указаны качественные признаки плохой обусловленности задачи, выражающиеся в регистрации ложных локальных минимумов.

5. Разработана специальная *методика интегрирования* жестких дифференциальных систем уравнений для целей идентификации кинетических моделей полимеризационных процессов, позволившая на несколько порядков сократить время однократного анализа моделей по сравнению со стандартными жестко-ориентированными процедурами.

6. Проведен анализ стандартного алгоритмического обеспечения в области конечномерной оптимизации (включая ньютоновские методы, методы доверительной



окрестности, квазиньютоновские методы и методы сопряженных градиентов), показавший актуальность задачи его совершенствования по следующим основным направлениям:

- построение общих процедур решения плохо обусловленных (жестких) задач, сохраняющих эффективность в условиях невыпуклости целевых функционалов;
- построение проблемно-ориентированных реализаций алгоритмов, рассчитанных на конкретные схемы конечномерной оптимизации, характерные для отдельных классов задач конкретной предметной области;
- построение методов решения плохо обусловленных задач конечномерной оптимизации большой размерности;
- разработка элементов структурного синтеза и принципов построения минимальных параметрических представлений искомых непрерывных зависимостей на основе методов удаления переменных.

Покоординатные стратегии оптимизации

1. На основе анализа явления *заклинивания* метода циклического покоординатного спуска (ЦПС) в условиях овражной ситуации показано, что заклинивание вызывается не столько наличием изломов в поверхностях уровня негладких целевых функционалов (что обычно отмечается в литературе), сколько дискретным представлением информации в компьютере.

2. Построен и исследован класс новых эффективных методов оптимизации — методов *обобщенного покоординатного спуска* (ОПС).

3. Доказана теорема об *устойчивости линейных оболочек* изолированных групп собственных векторов матрицы Гессе целевого функционала, позволяющая сформулировать и доказать теоремы, выражающие принцип *частичной локальной декомпозиции* задачи оптимизации при реализации методов ОПС. В результате показано, что применение методов ОПС для решения жестких оптимизационных задач, по существу, реализует принцип «разделения движений». Исходная плохо обусловленная задача локально аппроксимируется несколькими хо-

рошо обусловленными задачами, что резко повышает эффективность процедуры оптимизации в целом.

4. Доказана теорема о сходимости методов ОПС для широкого класса *невыпуклых* функционалов, что подтверждает тезис о высокой степени универсальности соответствующих алгоритмов.

5. Разработаны методы масштабирования и адаптивной нормализации основных переменных оптимизационной задачи с учетом конечной величины машинного эпсилон. Применение указанных методов позволяет в среднем в 1,5–2 раза сократить вычислительные затраты и предотвратить появление возможных сбойных ситуаций.

6. Построены общие реализации алгоритмов ОПС (алгоритмы SPAC1, SPAC2) на основе конечноразностных двусторонних аппроксимаций производных с адаптивной настройкой шагов дискретности.

7. Разработаны общие реализации алгоритмов ОПС на основе *рекуррентных алгоритмов оценивания* параметров линейных регрессионных моделей. В качестве базовых методов используются рекуррентный метод наименьших квадратов и модифицированный алгоритм Качмажа. Применение указанных процедур исключает необходимость прямого вычисления производных при реализации методов ОПС и представляется весьма перспективным для снижения общей трудоемкости решения задачи.

8. Разработаны специальные схемы реализации методов ОПС для следующих классов прикладных задач:

- идентификация нелинейных детерминированных объектов на основе функциональных рядов Вольтерра;
- идентификация стохастических объектов на основе корреляционных методов;
- синтез статистически оптимальных систем автоматического управления;
- идентификация нелинейных динамических систем;
- оценка состояний динамических систем (задача о наблюдении);
- идентификация возмущающих сил;
- управление технологическим процессом серийного выпуска изделий по критерию вероятности выхода годных;

- обеспечение максимального запаса работоспособности системы по заданному списку выходных параметров;

- задачи оптимального управления.

Указанные специальные реализации методов ОПС позволяют за счет учета конкретных структурных особенностей критериев качества, применяемых в перечисленных задачах, существенно сократить трудоемкость построения матриц Гессе целевых функционалов.

Приведенные результаты по применению разработанных процедур ОПС позволяют утверждать, что по сравнению с традиционными методами нелинейной оптимизации методы ОПС дают существенное расширение класса эффективно решаемых прикладных задач. При этом наблюдается как качественный эффект (решение задач, не решаемых известными методами), так и количественный — существенно меньшие временные затраты на решение задачи по сравнению с показателями работы стандартных оптимизирующих процедур.

Градиентные методы

1. Для класса матричных градиентных методов введено новое понятие *функции релаксации*, позволяющее с единых позиций оценивать эффективность градиентных оптимизирующих процедур, а также синтезировать новые методы, ориентированные на специальные классы плохо обусловленных (жестких) оптимизационных задач. Получены соотношения, позволяющие по произвольно заданной функции релаксации строить соответствующие поисковые процедуры.

2. Доказана теорема об *условиях релаксационности* произвольного матричного градиентного метода. На основе понятия функции релаксации рассмотрена геометрическая интерпретация релаксационных свойств градиентных методов, позволяющая строить области релаксационности, а также оценивать скорость убывания значений минимизируемых функционалов.

3. Дан анализ классических матричных градиентных схем: простого градиентного метода, метода Ньютона, метода Маркуардта—Левенберга. Показано, что

функция релаксации дает практически исчерпывающую информации о свойствах и возможностях соответствующей поисковой процедуры.

4. Рассмотрен новый класс методов с *экспоненциальной функцией релаксации* (ЭР-методы), естественным образом обобщающих классические методы спуска по антиградиенту, методы Ньютона, а также методы Маркуардта—Левенберга. В отличие от указанных методов, ЭР-методы имеют функции релаксации, целиком расположенные в области релаксационности, что существенно повышает вычислительную эффективность градиентных методов и облегчает процедуру настройки параметра, характеризующего норму вектора продвижения в пространстве поиска.

Доказаны теоремы, устанавливающие сходимость ЭР-методов для широкого класса невыпуклых функционалов и гарантирующие квадратичную скорость сходимости в предположении сильной выпуклости целевого функционала.

5. Построены реализации ЭР-методов (алгоритмы RELEX). Дан анализ влияния погрешностей на релаксационные свойства ЭР-методов, что позволило указать области эффективного применения соответствующих алгоритмов. Модульная структура алгоритма RELEX дает возможность воспользоваться развитой методикой аппроксимации матриц вторых производных с целью повышения эффективности решения конкретных классов задач теории управления.

6. Построены новые методы конечно-мерной оптимизации с большим числом управляемых параметров по функционалам со слабозаполненными и структурированными матрицами Гессе. В качестве основы для создания соответствующих оптимизирующих процедур предложены новые матричные градиентные схемы с *чебышевскими функциями релаксации*. Построено рекуррентное соотношение, позволяющее сохранять свойство разреженности матриц и упакованные формы их хранения в памяти компьютера на протяжении каждого цикла процесса оптимизации. Исследованы релаксационные свойства методов и особенности их реализации. Построен базовый алгоритм



RELCH. Даны характеристики сходимости алгоритма RELCH и проведено его сравнение с методами сопряженных градиентов (СГ). Получена оценка скорости сходимости метода СГ, а также выражение для «коэффициента выигрыша» алгоритмов класса RELCH по сравнению со стандартными методами СГ в зависимости от размерности решаемой задачи, ее обусловленности и степени разреженности соответствующей матрицы Гессе. Показано, что уже для относительно небольших степеней обусловленности при достаточно больших размерностях выигрыш, получаемый алгоритмом RELCH, может быть весьма значительным. Разработаны общие рекомендации по применению процедур RELEX, RELCH и ОПС в задачах теории управления.

7. Разработана *тактика решения* общей конечномерной оптимизационной задачи с помощью построенного нового алгоритмического обеспечения.

Методы уменьшения размерности вектора аргументов минимизируемых функционалов

1. Доказан *принцип квазистационарности производных* (ПКП) для линейных систем с симметричными матрицами, что позволило указать условия применимости ПКП и обосновать методы практического определения линейных связей, устанавливаемых вне пограничного слоя между фазовыми переменными жестких дифференциальных систем.

2. На основе структуры асимптотических связей сформулирована и доказана теорема о понижении размерности пространства поиска решаемой оптимизационной задачи. Получена оценка для *степени овражности* результирующего целевого функционала, определенного в $(n - 1)$ -мерном пространстве. Доказана теорема об асимптотическом понижении размерности пространства поиска оптимизационной задачи при произвольной размерности дна оврага.

3. Доказанные утверждения позволили обосновать процедуру *иерархической оптимизации* в последовательности подпространств пониженной размерности. Получены выражения для коэффициентов чувствительности решения оптимизацион-

ной задачи к изменению собственных чисел соответствующей матрицы Гессе; получены соотношения, устанавливающие внутренний механизм переноса погрешностей в задании исходных данных на окончательный результат. Предложен пример, иллюстрирующий на конкретном числовом материале смысл и эффективность методов иерархической оптимизации.

4. Построен общий алгоритм иерархической оптимизации МЮ. Указаны области рационального применения алгоритма МЮ.

5. Разработаны оригинальные методы *исключения переменных* на основе спектрального разложения матрицы Гессе в точке оптимума целевого функционала. Показано, что эффективность обычно применяемого метода, основанного на удалении «малых» составляющих оптимального вектора аргументов, существенно зависит от степени жесткости (обусловленности) целевого функционала. В результате применения такого подхода, например для упрощения избыточных структур оптимизируемых систем, могут получаться структуры, неоптимальные как по количеству составляющих их элементов, так и по качеству функционирования.

6. Предложен новый алгоритм исключения избыточных переменных, аналогичный гауссовскому методу исключения со специальным выбором ведущего элемента. В результате вариации управляемого вектора производятся только в пределах «дна» оврага, где общий показатель качества (критерий оптимальности) меняется относительно слабо. Реализация такого подхода позволяет на основе квадратичной модели критерия оптимальности системы указать максимальное число исключаемых параметров и оценить ожидаемое при этом ухудшение качества. Оставшиеся после исключения переменные соответствующим образом корректируются. Предложенный метод, в отличие от классического подхода, инвариантен относительно выбора масштабов управляемых переменных и степени овражности критерия оптимальности.

7. Разработана методология применения рассматриваемого подхода для *удаления переменных в задаче наименьших квадратов*.

На классическом тестовом примере продемонстрировано преимущество спектрального метода исключения по сравнению с классическим методом пошаговой регрессии, не позволяющим решить указанную задачу.

8. Обоснована целесообразность применения разработанного подхода в задачах *структурного синтеза*, а также при построении минимальных параметрических представлений искомым непрерывных зависимостей, например в таких задачах теории управления, как задачи идентификации нелинейных детерминированных объектов с использованием моделей Вольтерра, а также задачи идентификации и синтеза, приводящие к интегральным уравнениям Фредгольма 1-го рода (уравнения Винера–Хопфа), решаемым на основе алгебраических методов.

Методы принятия решений.

Теория многокритериальной оптимизации

1. Разработаны интерактивные (диалоговые) методы решения многокритериальных задач выбора вариантов при наличии неявно заданных функций полезности. Методы основаны на реализации разработанных поисковых процедур нелинейного программирования в *пространстве весовых коэффициентов* сверток Джоффриона. Построенные новые методы и соответствующие алгоритмы позволяют осуществлять эффективный процесс выбора вариантов по многим критериям на основе дополни-

тельной информации пользователя специального вида. При этом исходное множество допустимых альтернатив может быть произвольным (нечисловым) абстрактным множеством. Последнее обстоятельство позволяет говорить о создании принципиально нового подхода в области многокритериальной оптимизации.

2. Разработаны теория и методы решения многокритериального выбора на основе упорядочений, более сильных, чем отношения предпочтения Парето (*методы t-упорядочения*).

Выборочный список учебников и монографий, содержащих ссылки на публикации и основные результаты ученых петербургской школы, представлен книгами [16–25].

Перечень научных статей, содержащих ссылки на работы ученых петербургской школы в области оптимизации, можно найти, например, по базам данных ресурса elibrary. — более 600 ссылок за последние пять лет. Он свидетельствует о широкой известности полученных научных результатов и об их востребованности в самых различных областях науки, техники и промышленности. Примечательно, что многие результаты вошли в современные стандартные учебники, содержащие разделы по компьютерному моделированию и оптимизации и принятые в качестве основной литературы во многих ведущих университетах России, например [18, 23, 24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Черноруцкий, И.Г.** Методы параметрической оптимизации в задачах идентификации [Текст] / И.Г. Черноруцкий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — № 2(76). — С. 151–156.
2. **Черноруцкий, И.Г.** Параметрические методы синтеза систем управления [Текст] / И.Г. Черноруцкий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — № 2(76). — С. 111–115.
3. **Черноруцкий, И.Г.** Алгоритмические проблемы жесткой оптимизации [Текст] / И.Г. Черноруцкий // Научно-технические ведомости

СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — № 6(162). — С. 141–152.

4. **Ракитский, Ю.В.** Численные методы решения жестких систем [Текст] / Ю.В. Ракитский, С.М. Устинов, И.Г. Черноруцкий. — М.: Наука, 1979. — 208 с.

5. **Ракитский, Ю.В.** Численные методы решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / Ю.В. Ракитский, С.М. Устинов, И.Г. Черноруцкий. — Л.: Изд-во ЛПИ, 1977. — 84 с.

6. **Черноруцкий, И.Г.** Функции релаксации градиентных методов [Текст] / И.Г. Черноруцкий // Научно-технические ведомости СПбГПУ.

Информатика. Телекоммуникации. Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — № 3(150). — С. 66–72.

7. **Черноруцкий, И.Г.** Некоторые стандартные схемы параметрической оптимизации [Текст] / И.Г. Черноруцкий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — № 6(162). — С. 128–133.

8. **Черноруцкий, И.Г.** Плохо обусловленные задачи параметрической оптимизации в системах управления: Дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / И.Г. Черноруцкий. — Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина, 1987.

9. **Черноруцкий, И.Г.** Оптимальный параметрический синтез. Электротехнические устройства и системы [Текст] / И.Г. Черноруцкий. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 128 с.

10. **Черноруцкий, И.Г.** Методы оптимизации [Текст] / И.Г. Черноруцкий. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. — 108 с.

11. **Черноруцкий, И.Г.** Методы принятия решений [Текст] / И.Г. Черноруцкий. — Л.: Изд-во ЛПИ, 1990. — 92 с.

12. **Черноруцкий, И.Г.** Методы оптимизации и принятия решений [Текст] / И.Г. Черноруцкий. — СПб.: Лань, 2001. — 382 с.

13. **Черноруцкий, И.Г.** Методы оптимизации в теории управления [Текст] / И.Г. Черноруцкий. — СПб.: Питер, 2004. — 256 с.

14. **Черноруцкий, И.Г.** Методы принятия решений [Текст] / И.Г. Черноруцкий. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 408 с.

15. **Черноруцкий, И.Г.** Методы оптимизации. Компьютерные технологии [Текст] / И.Г. Черно-

руцкий. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 384 с.

16. **Иванов, В.В.** Методы вычислений на ЭВМ [Текст] / В.В. Иванов. — Киев: Наук. Думка, 1986. — 584 с.

17. **Первозванский, А.А.** Курс теории автоматического управления [Текст] / А.А. Первозванский. — М.: Наука. Гл. ред. физматлит, 1986. — 616 с.

18. **Бахвалов, Н.С.** Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. — М.: Наука. Гл. ред. физматлит, 1987. — 600 с.

19. **Черноруцкий, Г.С.** Следящие системы автоматических манипуляторов [Текст] / Г.С. Черноруцкий, А.П. Сибрин, В.С. Жабреев. — М.: Наука, 1987. — 272 с.

20. **Крутько, П.Д.** Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем [Текст] / П.Д. Крутько [и др.]. — М.: Радио и связь, 1988. — 306 с.

21. **Федоренко, Р.П.** Введение в вычислительную физику [Текст] / Р.П. Федоренко. — М.: Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та, 1994. — 528 с.

22. **Уткин, Л.В.** Анализ риска и принятие решений при неполной информации [Текст] / Л.В. Уткин. — СПб.: Наука, 2007. — 404 с.

23. **Петровский, А.Б.** Теория принятия решений [Текст] / А.Б. Петровский. — М.: Изд. центр «Академия», 2009. — 400 с.

24. **Калиткин, Н.Н.** Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 592 с.

25. **Демирчян, К.С.** Моделирование и машинный расчет электрических цепей [Текст] / К.С. Демирчян, П.А. Бутырин. — М.: Высш. школа, 1988. — 336 с.

REFERENCES

1. **Chernorutskii I.G.** Metody parametricheskoi optimizatsii v zadachakh identifikatsii / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2009. — № 2(76). — S. 151–156. (rus)

2. **Chernorutskii I.G.** Parametricheskie metody sinteza sistem upravleniia / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2009. — № 2(76). — S. 111–115. (rus)

3. **Chernorutskii I.G.** Algoritmicheskie problemy zhestkoi optimizatsii / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. — № 6(162). — S. 141–152. (rus)

4. **Rakitskii Iu.V.** Chislennyye metody resheniia zhestkikh sistem. — Moscow: Nauka, 1979.

— 208 s. (rus)

5. **Rakitskii Iu.V.** Chislennyye metody resheniia zhestkikh sistem obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii. — Leningrad: Izd-vo LPI, 1977. — 84 s. (rus)

6. **Chernorutskii I.G.** Funktsii relaksatsii gradientnykh metodov / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. — № 3(150). — S. 66–72. (rus)

7. **Chernorutskii I.G.** Nekotorye standartnye skhemy parametricheskoi optimizatsii / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. — № 6(162). — S. 128–133. (rus)

8. **Chernorutskii I.G.** Plokhoe obuslovlennyye zadachi parametricheskoi optimizatsii v sistemakh up-

равления: Dis. d-ra tehn. nauk. — Leningrad: LPI im. M.I. Kalinina, 1987. (rus)

9. **Chernorutskii I.G.** Optimal'nyi parametricheskii sintez. Elektrotekhnicheskie ustroistva i sistemy. — Leningrad: Energoatomizdat, 1987. — 128 s. (rus)

10. **Chernorutskii I.G.** Metody optimizatsii. — St.-Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 1998. — 108 s. (rus)

11. **Chernorutskii I.G.** Metody priniatiia reshenii. — Leningrad: Izd-vo LPI, 1990. — 92 s. (rus)

12. **Chernorutskii I.G.** Metody optimizatsii i priniatiia reshenii. — St.-Petersburg: Lan', 2001. — 382 s. (rus)

13. **Chernorutskii I.G.** Metody optimizatsii v teorii upravleniia. — St.-Petersburg: Piter, 2004. — 256 s. (rus)

14. **Chernorutskii I.G.** Metody priniatiia reshenii. — St.-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005. — 408 s. (rus)

15. **Chernorutskii I.G.** Metody optimizatsii. Komp'iuternye tekhnologii. — St.-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011. — 384 s. (rus)

16. **Ivanov V.V.** Metody vychislenii na EVM. — Kiev: Nauk. Dumka, 1986. — 584 s.

17. **Pervozvanskii A.A.** Kurs teorii avtomat-

icheskogo upravleniia. — Moscow: Nauka. Gl. red. fizmatlit, 1986. — 616 s. (rus)

18. **Bakhvalov N.S.** Chislennye metody. — Moscow: Nauka. Gl. red. fizmatlit, 1987. — 600 s. (rus)

19. **Chernorutskii G.S., Sibrin A.P., Zhabreev V.S.** Slediashchie sistemy avtomaticheskikh manipulatorov. — Moscow: Nauka, 1987. — 272 s. (rus)

20. **Krut'ko P.D. i dr.** Algoritmy i programmy proektirovaniia avtomaticheskikh sistem. — Moscow: Radio i sviaz', 1988. — 306 s. (rus)

21. **Fedorenko R.P.** Vvedenie v vychislitel'nuiu fiziku. — Moscow: Izd-vo Mosk. Fiz.-tekh. in-ta, 1994. — 528 s. (rus)

22. **Utkin L.V.** Analiz riska i priniatie reshenii pri nepolnoi informatsii. — St.-Petersburg: Nauka, 2007. — 404 s. (rus)

23. **Petrovskii A.B.** Teoriia priniatiia reshenii. — Moscow: Izd-vo tsentr «Akademiia», 2009. — 400 s. (rus)

24. **Kalitkin N.N.** Chislennye metody. — St.-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011. — 592 s. (rus)

25. **Demirchian K.S., Butyrin P.A.** Modelirovanie i mashinnyi raschet elektricheskikh tsepei. — Moscow: Vyssh. shkola, 1988. — 336 s. (rus)

ЧЕРНОРУЦКИЙ Игорь Георгиевич — директор Института информационных технологий и управления, заведующий кафедрой информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: director@icc.spbstu.ru

CHERNORUTSKIY, Igor G. St. Petersburg State Polytechnical University .

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: director@icc.spbstu.ru



УДК 519.233.22

*К. Андреа, Г.Л. Шевляков***ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ С ПОМОЩЬЮ БОКСПЛОТОВ,
ОСНОВАННЫХ НА НОВЫХ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ РОБАСТНЫХ
ОЦЕНКАХ МАСШТАБА***K. Andrea, G.L. Shevlyakov***OUTLIER DETECTION WITH BOXPLOTS BASED ON NEW HIGHLY
EFFICIENT ROBUST ESTIMATES OF SCALE**

Разработаны улучшенные робастные версии классического боксплота Тьюки на основе быстрых высокоэффективных робастных оценок масштаба. Методом Монте–Карло проведен сравнительный анализ классического и предложенных боксплотов при оценке качества обнаружения выбросов для двух больших групп моделей распределения: симметричных и асимметричных. Полученные результаты подтверждают преимущество новых предложенных методов при засоренных данных.

БОКСПЛОТ. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ. РОБАСТНОСТЬ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

Robust versions of Tukey's boxplot based on the low-complexity highly efficient robust estimates of scale are presented. Boxplots' performance is tested experimentally using Monte–Carlo method on two big groups of data distributions: symmetric and skewed models of distribution. The proposed versions of boxplots prove to be a better choice when dealing with contaminated data.

BOXPLOT. DATA VISUALIZATION. ROBUSTNESS. EFFICIENCY.

Основной вклад в развитие робастной статистики внесли пионерские работы Тьюки [1], Хьюбера [2] и Хампеля [3]. Робастность в статистике означает в широком смысле устойчивость статистических оценок в условиях отклонений от предполагаемой модели распределения данных. Методы робастной статистики основаны на асимптотическом подходе, однако их использование на малых по объему выборках данных также дает хорошие результаты, что обеспечивает возможность их широкого применения при решении практических задач.

В данной статье представлены новые результаты в области робастных методов обработки данных. Мы предлагаем робастные модификации классического боксплота. Классический одномерный боксплот Тьюки наглядно обобщает параметры распределения данных, позволяя быстро сравнивать выборки. Боксплот содержит информацию о параметрах положения и масштаба, а также о весе «хвостов» распределения, асим-

метрии распределения данных и наличии выбросов. В нашей статье основное внимание уделено повышению эффективности выявления выбросов и наглядности представления «хвостов» распределения.

Одномерный боксплот [4] определяется пятью параметрами: минимумом и максимумом выборки, нижним LQ и верхним UQ квартилями, интерквартильной шириной IQR (оценка масштаба) и выборочной медианой. Экстремумы («усы» боксплота) вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned}x_L &= \max\{x_{(1)}, LQ - \frac{3}{2} IQR\}, \\x_U &= \min\{x_{(n)}, UQ + IQR\}.\end{aligned}\tag{1}$$

Все элементы выборки, расположенные за пределами экстремумов, принято рассматривать как выбросы и отображать графически вместе с соответствующим боксплотом.

Графически внутренняя часть боксплота представлена как коробчатая конструкция с границами, равными нижнему и верхнему

квартилям, содержащая 50 % центральных порядковых статистик выборки. Выборочная медиана обозначается линией внутри коробки и делит интерквартильную область на две части. Прямые, исходящие из противоположных сторон коробки, обозначают «хвосты» распределения выборки, их длина определяется экстремумами по формуле (1).

Для улучшения стандартной модели были предложены различные модифицированные варианты боксплота. Среди таких модификаций можно выделить боксплот, графическое представление которого содержит информацию о доверительном интервале оценки параметра положения — медиане [5], что обеспечивает возможность сравнения качества оценки медианы нескольких выборок. В [6] предложена иная модификация боксплота, позволяющая включить в графическое представление информацию о плотности распределения данных. На базе боксплота, в графической структуре которого отображена информация о плотности распределения, разработаны другие виды боксплотов [7–9].

Различные модификации классического боксплота, как правило, расширяют набор доступных для визуального восприятия параметров, однако это требует дополнительных вычислительных ресурсов. В данной статье мы предлагаем простую по вычислительной сложности модификацию параметров классического боксплота через высокоэффективные робастные оценки масштаба.

Высокоэффективные робастные оценки масштаба в предложенных модификациях классического боксплота

На практике классический боксплот применяется для выявления выбросов, присутствующих в выборке. Мы можем повысить качество обнаружения аномальных данных посредством повышения качества определения экстремумов. В классическом варианте боксплота экстремумы выборки определяются через интерквартильную широту IQR, но эта оценка не обладает высокой эффективностью и робастностью.

Методы робастной статистики предлагают более устойчивые статистические оценки

для случаев, когда в выборке данных присутствуют выбросы, в частности, робастная, высокоэффективная, но вычислительно сложная Q_n -оценка масштаба [11]. В [12] предложена «быстрая» робастная высокоэффективная FQ_n -оценка масштаба, основанная на аппроксимации функции влияния Q_n -оценки. Показано, что максимальная эффективность предложенной FQ_n -оценки достигает 96 %, а минимальное возможное ее значение не опускается ниже уровня 81 % на нормальном распределении, при этом их пороговая точка (breakdown point [10]) достигает максимального значения 50 %. Используемая далее FQ_n -оценка масштаба имеет максимально высокую робастность, так же как медианное абсолютное отклонение $MAD = \text{med}|x - \text{med } x|$, но значительно более высокую эффективность (эффективность MAD на нормальном распределении равна 37 %).

Обобщим уравнения вычисления экстремумов боксплота следующим образом:

$$x_L = \{x_{(1)}, LQ - kS_n\}, x_U = \{x_{(n)}, UQ + kS_n\}, \quad (2)$$

где k — пороговое значение; S_n — робастная высокоэффективная оценка масштаба.

Предложенные нами версии боксплотов отличаются от классического подстановкой робастных оценок масштаба MAD_n и FQ_n в формулу (2). Результатом применения такого приема является изменение оценки экстремумов, что влияет на обнаружение выбросов. Проведем сравнительный анализ качества обнаружения выбросов классического и модифицированных боксплотов.

Сравнительный анализ качества обнаружения выбросов в модели Тьюки–Хьюбера

В статистике выбросом является наблюдаемое значение, заметно отличающееся от остальных элементов выборки [13]. Выбросы могут возникать случайным образом в любой модели распределения. Во многих случаях выбросы либо являются ошибками измерения, либо указывают на наличие тяжелых «хвостов» в модели распределения. В первом случае наличие таких аномальных результатов наблюдений — итог неправильной работы системы. Причиной появления

Таблица 1

Значения гармонического среднего H для модели засорения типа «масштаб» (3), $\mu = 0$, $s = 3$

$\varepsilon = 0,1$	20	50	100	1000	10 000
БП Тьюки	0,64	0,72	0,72	0,72	0,72
MAD-БП	0,67	0,72	0,73	0,73	0,73
FQ-БП	0,66	0,72	0,72	0,72	0,73
Граббс	0,17	0,29	0,30	0,30	0,30

выбросов нередко является смешение двух моделей распределений. Последняя ситуация формализуется моделью засорения Тьюки–Хьюбера [1]:

$$f(x) = (1 - \varepsilon)N(x; 0, 1) + \varepsilon N(x; \mu, s), \quad (3)$$

где $0 \leq \varepsilon < 1$ – вероятность появления выбросов; μ – параметр положения; s – параметр масштаба для распределения «плохих» данных.

В классическом методе определения выбросов, известном как тест Граббса [13], выбросом объявляется наблюдение x , для которого справедливо неравенство $|x - \bar{x}|/S > k_\alpha$, где $\bar{x}$ – выборочное среднее; S – среднеквадратическое отклонение; k_α – пороговое значение, определяемое вероятностью ложной тревоги (вероятность ошибки первого рода) для нормального распределения.

В данной статье мы обозначаем наблюдение x как выброс в случае $x < x_L$ и $x > x_U$, где x_L и x_U – соответственно нижняя и верхняя границы боксплота. Пороговое значение k_α выбирается экспериментально при условии, что вероятность ложной тревоги $\alpha = 0,1$.

Для сравнительного анализа эффективности тестов воспользуемся мерами чув-

ствительности (SE) и специфичности (SP). Чувствительность представляет собой мощность критерия, а специфичность – вероятность отсутствия ложной тревоги. Оба эти показателя комбинируем в один, вычисляя их гармоническое среднее $H = 2 SE SP / (SE + SP)$. Выбор гармонического среднего в качестве оценки эффективности обнаружения выбросов обусловлен тем свойством, что с его использованием можно успешно оценивать разные критерии выявления выбросов, отличающиеся по вероятности ложной тревоги. В нашей статье вероятности ложной тревоги классического боксплота и модифицированных боксплотов равны $\alpha = 0,06$ и $\alpha = 0,1$ соответственно.

Результаты экспериментов представлены в табл. 1, 2, где лучшие показатели выделены жирным шрифтом.

По результатам, указанным в табл. 1, 2, в обеих моделях засорения («сдвиг» и «масштаб») боксплоты не отличаются значительно по эффективности обнаружения выбросов, за исключением теста Граббса, демонстрирующего очень низкие показатели эффективности. Такое поведение теста Граббса можно объяснить неробастностью используемых в нем оценок сдвига и масштаба.

Таблица 2

Значения гармонического среднего H для модели засорения типа «сдвиг» (3), $\mu = 3$, $s = 1$

$\varepsilon = 0,1$	20	50	100	1000	10 000
БП Тьюки	0,75	0,79	0,80	0,80	0,80
MAD-БП	0,73	0,80	0,80	0,80	0,80
FQ-БП	0,73	0,79	0,81	0,81	0,81
Граббс	0,32	0,39	0,40	0,39	0,39

Таблица 3

Значения гармонического среднего H для модели засорения типа «сдвиг» с различными значениями ε

ε	0,05	0,10	0,20	0,30	0,4	0,5
БП Тьюки	0,63	0,62	0,59	0,55	0,51	0,43
MAD-БП	0,65	0,65	0,60	0,56	0,52	0,44
FQ-БП	0,67	0,67	0,61	0,56	0,50	0,40
Граббс	0,65	0,56	0,41	0,31	0,25	0,21

Робастные версии боксплотов немного превышают по эффективности классический боксплот.

В табл. 3 представлены результаты исследования зависимости эффективности обнаружения выбросов от параметра засорения ε . Среди малых и умеренных уровней засорения FQ-боксплот имеет самые лучшие показатели эффективности. В сильно засоренных выборках MAD-боксплот отличается более высоким уровнем эффективности по сравнению с остальными. Такое поведение MAD-боксплота обусловлено принадлежностью оценки масштаба MAD к классу минимаксных робастных оценок параметра масштаба [10].

Сравнительный анализ качества обнаружения выбросов в асимметричных моделях распределения данных

Несмотря на способность классического боксплота выявлять асимметрию распределения данных, подход к определению экстремумов боксплота, наоборот, предполагает наличие симметрии. Значения экстремумов зависят только от значения интерквартильной широты. Минимальное и максимальное значения боксплота симметричны относительно параметра сдвига в формуле (1). В условиях нормального закона распределения такая симметрия естественна, причем выбор порогового значения $k = 1,5$ обусловлен правилом трех сигм. Последнее означает, что вероятность определения выбросом регулярного наблюдения составляет 0,003. Такое правило справедливо для нормально распределенных данных, но в общем случае оно хорошо работает и для остальных симметричных моделей распределения.

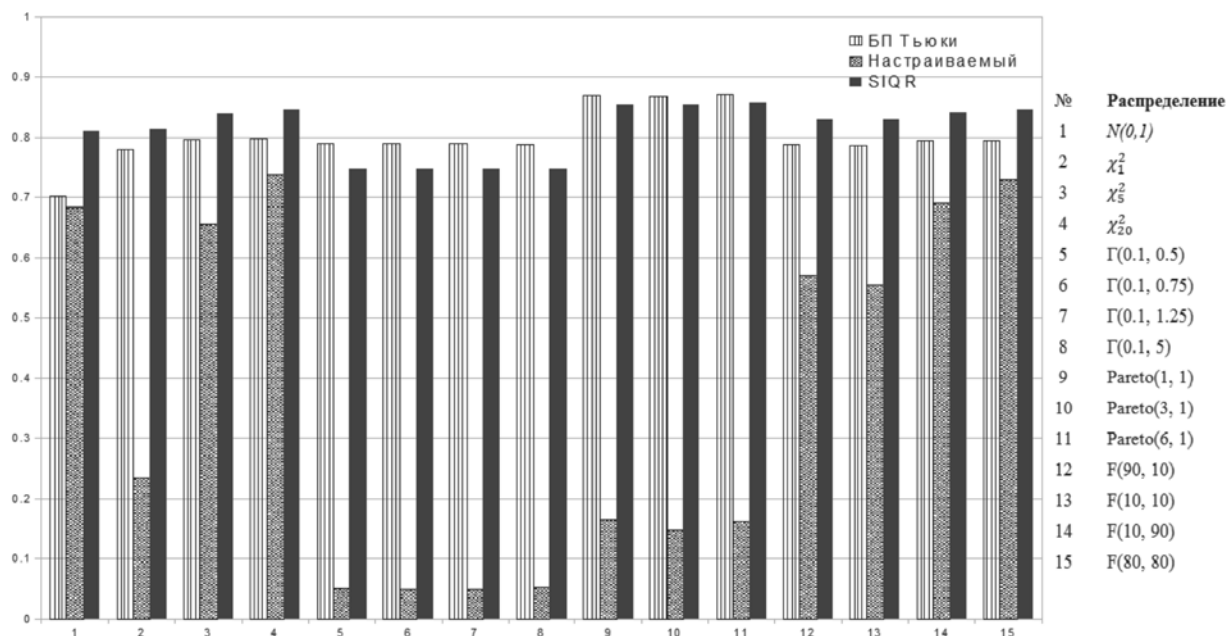
Разнообразие асимметричных моделей

не позволяет обобщить вычисления экстремумов (параметров «усов») боксплота. Для правильного вычисления экстремумов важно точно определить квантили изучаемой модели, чтобы с заданной вероятностью не пропускать регулярные наблюдения. Применение классического боксплота для асимметрично распределенных данных приводит к сильным искажениям в визуализации (неверная наглядная информация) и повышает ошибку обнаружения выбросов (когда регулярные наблюдения попадают в категорию выбросов).

Предложенные модификации классического боксплота для работы с асимметричными моделями основаны на оценке асимметрии данных выборки. Дополнительное требование, предъявляемое к асимметричным боксплотам — классическое поведение при наличии симметрии изучаемой выборки. Проведем сравнительный анализ следующих методов по эффективности обнаружения выбросов:

- классический боксплот Тьюки;
- SIQR-боксплот [14], вычисления экстремумов которого определяются по верхней и нижней половинам интерквартильного размаха $SIQR_U = Q_3 - Q_2$, $SIQR_L = Q_2 - Q_1$ соответственно. Экстремумы вычисляются следующим образом: $x_L = \max\{x_{(1)}, Q_1 - 3SIQR_L\}$, $x_U = \min\{x_{(n)}, Q_3 + 3SIQR_U\}$;
- настраиваемый боксплот (adjusted boxplot) [15], алгоритм которого реализован в статистической среде **R**.

Монте-Карло эксперимент проведен тысячу раз на выборке объемом 1000 с засорением типа «сдвиг» при $\varepsilon = 0,05$. Моделированы данные пяти групп распределений: стандартное нормальное распределение, χ^2 , Г, Pareto и F-распределение.



Результаты эффективности выявления выбросов
для различных асимметричных моделей распределения и $\varepsilon = 0,05$.
Порядковый номер на оси абсцисс соответствует распределению в таблице справа

На рисунке преобладают высокие оценки H для SIQR-боксплота и боксплота Тьюки. Настраиваемый боксплот выдает самые худшие показатели по эффективности выявления выбросов, что можно объяснить его настройкой на низкую вероятность ложной тревоги. Средние значения H по всем моделям распределения равны 0,81 для SIQR-боксплота, 0,8 для классического боксплота и 0,37 для настраиваемого боксплота. Таким образом, классический боксплот Тьюки можно рекомендовать использовать и при асимметричном засорении.

Исходя из результатов проведенного анализа, можно рекомендовать применение MAD-боксплота для сильно засоренных выборок, в то время как для умеренного и малого засорения выборки лучше применять FQ-боксплот. Пороговые значения, определяющие экстремумы, необходимо настроить в зависимости от желаемого уровня вероятности ложной тревоги. При $\alpha = 0,1$ мы рекомендуем воспользоваться значениями $k_{\text{MAD}} = 1,44$ и $k_{\text{FQ}} = 0,97$ в случае нормального распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tukey, J.W.** A survey of sampling from contaminated distributions [Text] / J.W. Tukey // Contributions to Probability and Statistics. — 1960. — P. 448–485.
2. **Huber, P.J.** Robust estimation of a location parameter [Text] / P.J. Huber // Ann. Math. Statist. — 1964. — № 1. — Vol. 35. — P. 73–101.
3. **Hampel, F.R.** Contributions to the Theory of Robust Estimation [Text] / F.R. Hampel // Ph.D. thesis. — University of California, Berkeley, 1968.
4. **Tukey, J.W.** Exploratory Data Analysis [Text] / J.W. Tukey. — Addison-Wesley—Reading, MA, 1977.
5. **McGill, R.** Variations of box plots [Text] / R. McGill, J.W. Tukey, W.A. Larsen // The American Statistician. — 1978. — № 1. — Vol. 32. — P. 12–16.
6. **Potter, K.** Methods for Presenting Statistical Information: The Box Plot [Text] / K. Potter // Visualization of Large and Unstructured Data Sets, University of Utah. — 2006. — Vol. S-4. — P. 97–106.
7. **Benjamini, Y.** Opening the box of a boxplot [Text] / Y. Benjamini // The American Statistician. — 1988. — № 4. — Vol. 42. — P. 257–262.
8. **Esty, W.W.** The box-percentile plot [Text] /

W.W. Esty, J. Banfield // J. of Statistical Software. – 2003. – Vol. 8. – № 17. – P. 181–184.

9. **Hintze, J.L.** Violin plots: A box plot-density trace synergism [Text] / J.L. Hintze, R.D. Nelson // The American Statistician. – 1998. – Vol. 52. – № 2. – P. 181–184.

10. **Hampel, F.R.** Robust statistics: the approach based on influence functions [Text] / F.R. Hampel, E.M. Ronchetti, P.J. Rousseeuw, W.A. Stahel // Wiley series in probability and mathematical statistics. Probability and mathematical statistics. – Wiley&Sons, 2005.

11. **Rousseeuw, P.J.** Alternatives to the median absolute deviation [Text] / P.J. Rousseeuw, C. Croux // J. of the American Statistical Association. – 1993. – Vol. 88. – № 424. – P. 1273–1283.

12. **Shevlyakov, G.L.** On approximation of the Q_n -estimate of scale by fast M-estimates [Text] / G.L. Shevlyakov, P.O. Smirnov // Internat. Conf. on Robust Statistics. – Parma, Italy, 2010.

13. **Grubbs, F.E.** Procedures for detecting outlying observations in samples [Text] / F.E. Grubbs // Technometrics. – 1969. – Vol. 11. – № 1. – P. 1–21.

14. **Kimber, A.C.** Exploratory data analysis for possibly censored data from skewed distributions [Text] / A.C. Kimber // Applied Statistics. – 1990. – Vol. 39. – № 1. – P. 21–30.

15. **Hubert, M.** An adjusted boxplot for skewed distributions [Text] / M. Hubert, E. Vandervieren // Computational Statistics & Data Analysis. – 2008. – Vol. 52. – № 12. – P. 5186–5201.

REFERENCES

1. **Tukey J.W.** A survey of sampling from contaminated distributions / Contributions to Probability and Statistics. – 1960. – P. 448–485.

2. **Huber P.J.** Robust estimation of a location parameter / Ann. Math. Statist. – 1964. – № 1. – Vol. 35. – P. 73–101.

3. **Hampel F.R.** Contributions to the Theory of Robust Estimation: Ph.D. thesis. – University of California, Berkeley, 1968.

4. **Tukey J.W.** Exploratory Data Analysis. – Addison-Wesley – Reading, MA, 1977.

5. **McGill R., Tukey J.W., Larsen W.A.** Variations of box plots / The American Statistician. – 1978. – № 1. – Vol. 32. – P. 12–16.

6. **Potter K.** Methods for Presenting Statistical Information: The Box Plot / Visualization of Large and Unstructured Data Sets, University of Utah. – 2006. – Vol. S-4. – P. 97–106.

7. **Benjamini Y.** Opening the box of a boxplot / The American Statistician. – 1988. – № 4. – Vol. 42. – P. 257–262.

8. **Esty W.W., Banfield J.** The box-percentile plot / Journal of Statistical Software. – 2003. – Vol. 8. – № 17. – P. 181–184.

9. **Hintze J.L., Nelson R.D.** Violin plots: A box plot-density trace synergism / The

American Statistician. – 1998. – Vol. 52. – № 2. – P. 181–184.

10. **Hampel F.R., Ronchetti E.M., Rousseeuw P.J., Stahel W.A.** Robust statistics: the approach based on influence functions / Wiley series in probability and mathematical statistics. Probability and mathematical statistics. – Wiley&Sons, 2005.

11. **Rousseeuw P.J., Croux C.** Alternatives to the median absolute deviation. / Journal of the American Statistical Association. – 1993. – Vol. 88. – № 424. – P. 1273–1283.

12. **Shevlyakov G.L., Smirnov P.O.** On approximation of the Q_n -estimate of scale by fast M-estimates / Internat. Conf. on Robust Statistics. – Parma, Italy, 2010.

13. **Grubbs F.E.** Procedures for detecting outlying observations in samples / Technometrics. – 1969. – Vol. 11. – № 1. – P. 1–21.

14. **Kimber A.C.** Exploratory data analysis for possibly censored data from skewed distributions / Applied Statistics. – 1990. – Vol. 39. – № 1. – P. 21–30.

15. **Hubert M., Vandervieren E.** An adjusted boxplot for skewed distributions / Computational Statistics & Data Analysis. – 2008. – Vol. 52. – № 12. – P. 5186–5201.

АНДРЕА Клитон – аспирант кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: kliton.andrea@gmail.com

ANDREA, Kliton St. Petersburg State Polytechnical University .

195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: kliton.andrea@gmail.com

ШЕВЛЯКОВ Георгий Леонидович — профессор кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: Georgy.Shevlyakov@phmf.spbstu.ru

SHEVLYAKOV, Georgy L. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: Georgy.Shevlyakov@phmf.spbstu.ru

УДК 621.318:621.313

Г.А. Евдокунин, Е.Н. Попков

ПРИНЦИПЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

G.A. Evdokunin, E.N. Popkov

CONCEPTS OF SIMULATION MODELLING OF PROCESSES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Рассмотрены принципы имитационного моделирования в электроэнергетических системах. Показаны проблемы моделирования, связанные с комплексным учетом подсистем, составляющих технологический процесс производства, передачи и распределения электрической энергии.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ. СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР. ТРАНСФОРМАТОР. ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.

This paper covers concepts of simulation modelling in electric power systems, problems of modelling, connected to the complex calculation of transient processes in subsystems, that form the technological process of generation, transmission and distribution of electrical energy.

SIMULATION MODELLING. ELECTRIC POWER PLANT. SYNCHRONOUS GENERATOR. TRANSFORMER. ELECTRIC POWER LINE.

Имитационное моделирование является практически единственным способом исследования больших электроэнергетических систем. Получение имитационной модели системы, последующее изучение и корректировка ее свойств позволяет обойтись без дорогостоящего физического моделирования.

Электроэнергетические системы содержат хотя и обширный, но ограниченный набор типовых элементов, обеспечивающих производство, преобразование, передачу, распределение электрической энергии и ее использование. С учетом возможного набора элементов имитационная модель электроэнергетической системы должна обеспечивать совместное моделирование процессов, протекающих как в силовой электрической части системы (в турбинах, генераторах, трансформаторах линиях электропередачи, нагрузках и др. оборудовании), так и в механических подсистемах, образованных соединением валопроводов вращающихся машин и приводных механизмов, подсистемах автоматики, управления и регулирования. Наличие транс-

форматорного оборудования предполагает необходимость совместного моделирования электрических процессов в силовой части и процессов в магнитных системах. Таким образом, имитационная модель электроэнергетической системы в общем случае должна допускать совместное моделирование процессов в силовой электрической части, в механических и магнитных подсистемах, в цепях регулирования и управления.

Получение имитационной модели системы весьма трудоемкий процесс, требующий высокой и всесторонней квалификации. В связи с этим заслуживают внимания работы, направленные на автоматизацию этого процесса [1].

Очевидно, что для успешного решения задачи получения имитационной модели необходима реализация принципа блочного построения имитационных моделей с использованием макромоделей типовых элементов электроэнергетических систем относительно внешних полюсов. При этом следует иметь в виду, что для одного и того же реального объекта в зависимости от решаемой задачи могут использоваться



различные макромодели. Так, например, синхронный генератор в моделируемой электроэнергетической системе может быть представлен как простейшим эквивалентом в виде системы соответствующих трехфазных электродвижущих сил за реактивностью, так и макромоделью, не имеющей других допущений по сравнению с полным описанием процессов в электрической машине, например, с использованием уравнений Парка–Горева. Получение макромодели синхронного генератора в последнем случае предполагает необходимость учета процессов в демпферных контурах, в обмотке возбуждения и моментов на валу. Напряжение возбуждения синхронного генератора может задаваться как воспроизведением подключенных устройств регулирования, так и алгоритмическим описанием регулятора. Аналогично, вращающий момент на валу генератора может задаваться либо моментно-скоростной характеристикой турбины, либо ее более подробной моделью с учетом необходимого регулирования. Отсюда следует, что в общем случае при разработке эквивалента типового элемента электроэнергетической системы могут использоваться схемы замещения, уравнения и алгоритмы.

Наличие в общем случае в составе электроэнергетической системы вентильных преобразовательных устройств, работающих совместно, например, с вращающимися машинами, предъявляет специфические требования к моделированию электрических машин. Поскольку для правильного отражения работы преобразователей необходимо определение мгновенных значений токов и напряжений для вентильных элементов, то при макромоделировании электрических машин нецелесообразно использовать традиционные $d, q, 0$ -координаты. Для исключения преобразования результатов численного решения уравнений, описывающих процессы в электрических машинах, и обеспечения возможности подключения к силовым электрическим полюсам машин любых других элементов моделируемой электроэнергетической системы естественным является использование фазных координат и получение эквивалента относитель-

но внешних выводов статорных обмоток. При таком подходе процессы в роторных контурах описываются дифференциальными уравнениями первого порядка, вид и способ решения которых не зависит от внешней схемы. Использование такой модели предполагает алгоритмический учет системы возбуждения. Если предполагается подключение устройств системы возбуждения, то макромодель электрической машины должна иметь выводы обмотки возбуждения. Потребность моделирования многомашинных агрегатов, протяженных валопроводов, а также двигателей в совокупности с приводными механизмами порождает образование механической подсистемы. С учетом электромеханической аналогии для моделирования процессов в механических подсистемах могут использоваться электрические схемы замещения с внешними полюсами возможного подключения макромоделей других элементов, содержащих механические подсистемы. Таким образом, макромодель электрической машины в общем случае может содержать схему замещения силовой подсистемы, систему дифференциальных уравнений и схему замещения механической подсистемы.

Если говорить о макромоделях трансформаторного оборудования электроэнергетических систем (повышающие и понижающие трансформаторы, трансформаторы с РПН, автотрансформаторы, управляемые шунтирующие реакторы различной конструкции и принципа действия, фазопоротные трансформаторы и др.), то они также должны быть реализованы в фазных координатах относительно внешних полюсов и допускать, если необходимо, задание нужной схемы и группы соединения обмоток. Могут использоваться как макромодели трехфазных групп однофазных трансформаторов, так и трехфазных трансформаторов с магнитной связью между обмотками. Необходимость воспроизведения различных режимов работы трансформаторного оборудования, включая и режимы, связанные с учетом насыщения магнитной системы, требует подробного учета конфигурации и состояния магнитопровода. Один из возможных способов такого уч-

та — совместное использование уравнений электрических цепей и схем замещения магнитной системы [2].

Моделирование линий электропередачи наиболее удобно проводить с использованием модальных преобразований, позволяющих моделировать процессы в независимых модальных каналах [3]. Поскольку процессы в линиях электропередачи имеют волновой характер, то метод «бегущих» волн является наиболее предпочтительным для анализа процессов в них. Алгоритм оперирует волнами тока и напряжения, движущимися в противоположных направлениях. Комбинация этих волн в каждом сечении линии определяет токи и напряжения, изменяющиеся во времени. Для граничных сечений токи и напряжения характеризуются взаимодействием входящих волн с подключенными электроэнергетическими объектами. Отсюда следует, что процессы, протекающие в линиях электропередачи и подключенных в граничных сечениях электроэнергетических объектах, не могут рассматриваться независимо. Поскольку макромодели электроэнергетических объектов, как следует из сказанного выше, имеют схемы замещения с сосредоточенными параметрами, то для воспроизведения влияния линий электропередачи в граничных сечениях целесообразно также использовать специальные схемы замещения, следующие из метода бегущих волн. Таким образом, макромодели линий электропередачи должны содержать схемы замещения для учета граничных сечений и алгоритмы, описывающие движение волн.

Соединение внешних полюсов макромоделей элементов исследуемой электроэнергетической системы приводит в общем случае к образованию расчетных схем силовой электрической, механической, магнитной подсистем и цепей регулирования.

Для расчетных схем силовой электрической подсистемы свойственна высокая степень идеализации. Как правило, в расчетных схемах не указываются активные сопротивления токоведущих частей, паразитные емкости оборудования, индуктивности ошиновки. Это с одной стороны облегчает

проведение анализа, поскольку позволяет пренебрегать малозначимыми процессами, а с другой стороны в системах с преобразовательными устройствами, содержащими идеальные ключи, приводит к новым проблемам.

Одна из проблем состоит в том, что в идеализированных расчетных схемах при коммутациях возможны мгновенные изменения напряжений конденсаторов и токов катушек индуктивности. Другая проблема состоит в появлении бесконечных по величине токов и напряжений, обусловленных коммутациями. Эти токи и напряжения учитывать необходимо, поскольку под их воздействием возможны каскадные коммутации ключевых элементов расчетной схемы.

Расчетные схемы механических подсистем, как правило, не велики по объему, отражают объединение элементов по валу и представлены совокупностью независимых компонент.

Расчетные схемы магнитных подсистем также представлены совокупностью независимых компонент и являются эквивалентами магнитопроводов трансформаторного оборудования. Для этих схем свойственна нелинейность некоторых ее элементов.

Цепи регулирования в общем случае представляются набором алгебраических и дифференциальных уравнений первого порядка относительно переменных состояния, вид и способ решения которых не зависит от схемы соединения макромоделей электроэнергетических объектов.

Опыт разработки макромоделей электроэнергетических объектов показывает, что расчетные схемы замещения подсистем могут быть построены из замкнутых и разомкнутых идеальных ключей, источников эдс и тока, резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и однофазных двухобмоточных идеальных трансформаторов. Поскольку расчетные схемы подсистем могут иметь произвольную структуру, то для получения математического описания процессов в них и в целом в исследуемой электроэнергетической системе следует использовать универсальную методику формирования уравнений [1].



На кафедре электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета под руководством и при непосредственном участии авторов разработаны как методики получения макромоделей типовых элементов электроэнергетических систем, так и универсальная методика формирования уравнений в расчетных схемах произволь-

ной конфигурации и на их основе создан вычислительный комплекс для имитационного моделирования процессов в электроэнергетических системах произвольной структуры из доступного набора макромоделей типовых элементов, который на протяжении ряда десятилетий успешно используется для исследования различных систем гражданского и специального назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коротков, Б.А.** Алгоритмы имитационного моделирования переходных процессов в электрических системах: Учеб. пособие [Текст] / Б.А. Коротков, Е.Н. Попков. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. — 280 с.

2. **Дмитриев, М.В.** Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы [Текст] / М.В. Дмитриев, А.С. Карпов, Е.Б. Шескин [и

др.]; Под ред. Г.А. Евдокунина. — СПб.: Родная Ладога, 2013. — 280 с.

3. **Евдокунин, Г.А.** Электрические системы и сети: Учеб. пособие для студентов электротехнических специальностей вузов [Текст] / Г.А. Евдокунин; Изд. 3-е, испр. и доп. — СПб.: ООО «Синтез Бук», 2011. — 288 с.

REFERENCES

1. **Korotkov B.A., Popkov E.N.** Algoritmyi imitatsionnogo modelirovaniya perehodnyih protsessov v elektricheskikh sistemah: Ucheb. posobie. — Leningrad: Izd-vo LGU, 1987. — 280 s. (rus)

2. **Dmitriev M.V., Karpov A.S., Sheskin E.B., Dolgoplov A.G., Kondratenko D.V.** Upravlyaemye podmagnichivaniem shuntiruyushchie reaktoryi; Pod

red. Evdokunina G.A. — St-Petersburg: Rodnaya Ladoga, 2013. — 280 s. (rus)

3. **Evdokunin G.A.** Elektricheskie sistemy i seti: Ucheb. posobie dlya studentov elektrotehnicheskikh spetsialnostey vuzov. — Izd. 3-e, ispr. i dop. — St-Petersburg: ООО «Sintez Buk», 2011. — 288 s. (rus)

ЕВДОКУНИН Георгий Анатольевич — профессор кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: evdg@telecom.spb.ru

EVDOKUNIN Georgy A. St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

ПОПКОВ Евгений Николаевич — заведующий кафедрой электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, доцент.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: ENPopkov@gmail.com

POPKOV Evgeny N. St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

УДК 621.311.24

*А.Л. Логинов, В.В. Потехин, Д.В. Акулов,
А.К. Хритonenков, И.Г. Полетаев*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ

*A.L. Loginov, V.V. Potekhin, D.V. Akulov,
A.K. Khritonenkov, I.G. Poletaev*

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF AUTONOMOUS WIND FARM

Обоснована проблема управления автономной ветроэлектростанцией. Описан способ решения этой проблемы при помощи комбинации Адаптивного Эвристического Критика, использующего модель обучения с подкреплением, и нечеткой логики. В среде Matlab/Simulink разработана математическая модель автономной ветроэлектростанции. Выполнено сравнение работы ветроэлектростанции без управления и с использованием интеллектуальной системы управления.

ИНТЕГРИРОВАННАЯ ГИБРИДНАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СЕТЬ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА. АВТОНОМНАЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ.

The problem of wind farm intelligent control is described, and given a way to solve the problem with using a combination of Adaptive Heuristic Critic model with Reinforcement Learning and Fuzzy Inference System. Autonomous wind farm is modelled in Matlab/Simulink. Wind farm work using intelligent control system is compared with wind farm work without control.

INTEGRATED DISTRIBUTED HYBRID NETWORK. INTELLIGENT CONTROL SYSTEM. WIND TURBINE. AUTONOMOUS WIND FARM. NEURAL NETWORK SYSTEM.

В современном мире развитие страны определяется состоянием ее энергетического комплекса. Традиционно в качестве основного источника энергии использовалось органическое топливо (нефть, газ, уголь). Однако ограниченность запасов органического топлива и неэкологичность его применения требуют развития альтернативных направлений энергетики. Всё активнее используются такие источники энергии, как ветроустановки, геотермальные генераторы, солнечные батареи и др. Количество энергии ветра на нашей планете в сто раз превосходит энергию всех рек, добытую гидроэлектростанциями.

Характеристика вырабатываемой энергии зависит от скорости ветра, а если быть точнее, от третьей степени скорости ветра [1]. На рис. 1 представлен график зависимости вырабатываемой мощности от частоты вращения ротора генератора при раз-

личной скорости ветра.

Появляется необходимость в интеллектуальных алгоритмах высокого уровня,

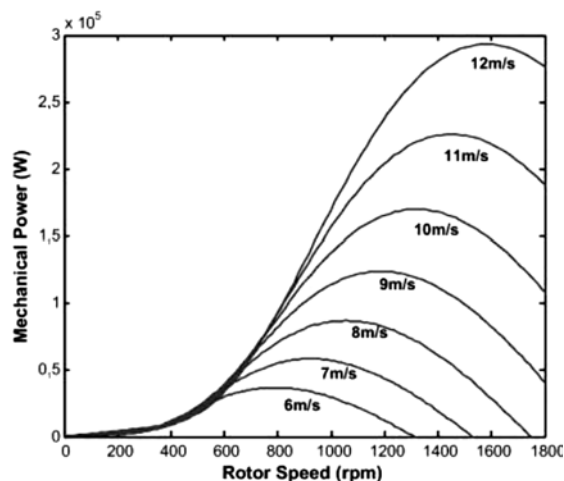


Рис. 1. Зависимость вырабатываемой мощности от частоты вращения ротора при различной скорости ветра



позволяющих обеспечить оптимальную частоту вращения ветроколеса при определенной скорости ветра. Используемые в подобных случаях принципы управления требуют принятия сложных оперативных решений на основе оценивания большого числа параметров в условиях недостаточной информации или ограниченных условий, т. к. направление и скорость потока ветра непостоянны и слабо предсказуемы [2].

Кроме того, требуется учитывать взаимовлияние ветроустановок, т. к. поместив одну турбину по направлению движения ветра за другой турбиной, мы получим уменьшение скорости ветряного потока после первой турбины, и как результат — уменьшение суммарной выработки электроэнергии [3–6].

В [7, 8] приведены примеры алгоритмов управления с использованием нечеткой логики. В [9–11] алгоритмы управления ВЭС основаны на нейросетевых методах.

В качестве способа управления системой ВЭС предложено использовать мультиагентный подход. Разработана мультиагентная система для организации взаимодействия составных частей ВЭС, сбора данных, передачи и обработки управляющих воздействий. Система управления ВЭС подобно физической системе ВЭС обладает иерархической структурой. В корне иерархии находится панель управления ВЭС, осуществляющая наблюдение и контроль над работой всей системы в целом. На следующих уровнях иерархии находятся узлы, отвечающие за работу отдельных элементов, таких, как группы ВЭУ, ниже находятся отдельные ВЭУ, а также модель потребления. На последнем уровне иерархии находятся частные потребители электроэнергии.

Мультиагентная система может быть представлена в виде ориентированного нагруженного графа, вершинами которого являются интеллектуальные агенты, а ребрами — каналы передачи сообщений и электроэнергии. Иерархия похожа на граф-дерево с тем лишь различием, что между непосредственными потомками одного и того же агента могут существовать дополнительные каналы передачи электроэнергии, используемые для балансировки объема по-

даваемой электроэнергии или как запасные каналы передачи энергии в случае выхода из строя главных каналов.

Такую систему можно считать альтернативным вариантом организации системы в виде группы брокеров. Каждый брокер взаимодействует с ограниченным локальным набором клиентов, а также взаимодействует с соседними брокерами, тем самым реализуя распределенный механизм обмена сообщениями между агентами. Важным свойством такого подхода является масштабируемость и отказоустойчивость.

Система может быть разделена на две основные части: орган центрального управления и агенты. Каждый из агентов взаимодействует с локальным программируемым логическим контроллером, либо получает данные с сенсоров. Основная функциональность агентов — это чтение данных сенсоров и трансляция управляющих воздействий, если это предусмотрено функциями агента. Взаимодействие агентов с центральным управляющим устройством и между собой производится через сеть обработки событий.

Механизм коммуникации между агентами и сетью обработки данных реализуется по принципу публикация-подписка.

Сеть обработки событий накладывает фильтры на события, транслируемые агентами. В результате на выходе из сети формируется несколько уровней иерархии событий. Начиная от низкоуровневых сообщений об ошибках, заканчивая сформированными на основе событий низкого уровня событиями, например событиями состояния отдельных компонент системы.

Структура интеллектуального агента во многом зависит от того, какие роли присвоены агенту во время разработки системы. Единственное оборудование, которое присутствует в каждом интеллектуальном агенте, — это управляющее оборудование, но также может присутствовать и дополнительное оборудование, например метеоборудование для метеостанции. В текущем проекте управляющее оборудование моделируется в среде Matlab, но для физической реализации могут применяться промышленные программируемые логические

контроллеры (ПЛК).

В данной мультиагентной системе можно выделить следующие основные роли агентов:

- главное управляющее устройство;
- группа ВЭУ;
- отдельная ВЭУ;
- зарядное устройство;
- метеостанция;
- автономный потребитель;
- бойлер.

Все агенты имеют одинаковую базовую структуру и функциональность.

Каждый агент способен выполнять действия согласно информации, поступившей с верхних уровней иерархии. Однако агенты отличаются друг от друга действиями, которые для них доступны, в зависимости от занимаемой ими позиции в иерархии системы.

Для обеспечения среды взаимодействия между агентами, а также инструментов диагностики вводится понятие системы сбора событий. Большинство распределенных систем имеют встроенные системы диагностики. Такие системы используют логи, формируемые исполняющими модулями, для выявления производительности базовых операций, выполняемых системой. Операторы, работающие с такого рода системами, могут получить значительное количество информации уровня базовых операций, однако получение аналитических данных более высокого уровня остается проблематичным. Безусловно, существуют различные аналитические системы, позволяющие осуществлять подробные аналитические срезы постфактум, однако для системы ветроэлектростанции критически важным может быть быстрота реакции не только на базовых уровнях, но и на других уровнях абстракции. В результате на текущий момент в основном существуют развитые системы диагностики низкоуровневых проблем, а также верхнеуровневые аналитические системы.

В данном проекте также возникает потребность обработки событий, происходящих на различных уровнях иерархии. Основой предлагаемого подхода является сбор низкоуровневых событий из систем

диагностики, агрегация их и преобразование в события более высокого уровня.

В общем случае поток событий содержит значительные объемы информации. Отдельное событие не имеет значения, но события коррелируют между собой, их взаимосвязи должны учитываться. Шаблоны сообщений описывают взаимосвязи между событиями в облаке событий и имеют определенное значение в предметной области.

Система обработки событий содержит:

- источники событий — предоставляют атомарные события;

- обработчики событий — СЕР компоненты находят шаблоны событий;

- агенты обработки событий — компоненты, осуществляющие реакцию на определенные события.

Сеть обработки событий позволяет организовать мониторинг текущего состояния системы, выявить верхнеуровневые события и передать их соответствующим агентам.

Взаимодействие агентов определяется ситуационными и плановыми векторами.

Ситуационные векторы содержат полную информацию о текущем состоянии агента или группы агентов. Формат ситуационных векторов заранее определяется при дизайне системы и не может изменяться во время исполнения. При инициализации системы агенты формируют ситуационные вектора и постоянно поддерживают их в актуальном состоянии на протяжении всего времени работы мультиагентной системы. Существует три вида ситуационных векторов:

- локальный ситуационный вектор;
- групповой ситуационный вектор потомственной группы;
- групповой ситуационный вектор родительской группы.

Локальный ситуационный вектор может иметь различные параметры в зависимости от уровня иерархии. Приведем общий набор параметров для локального вектора:

- уникальный идентификационный номер (ИН), присваиваемый агенту при дизайне системы;
- иерархический уровень агента;
- потребляемая активная мощность;
- скорость ветра;



направление ветра;
температура воздуха;
влажность воздуха;
скорость вращения ротора отдельной ВЭУ;
кпд отдельной ВЭУ;
мощность для отдельной ВЭУ;
частота ВЭУ для отдельной ВЭУ;
ток для отдельной ВЭУ;
уровень заряда АКБ;
статус запроса на заряд АКБ;
мощность АКБ;
частота АКБ;
ток АКБ;
температура воды в бойлере;
состояние отдельной ВЭУ;
состояние АКБ;
состояние коммуникационного LAN-оборудования.

Если локальный ситуационный вектор описывает состояние одного агента, то групповые векторы описывают состояния всех объектов в заданной группе. Формирование группового ситуационного вектора потомственной группы и группового ситуационного вектора родительской группы происходит по следующему алгоритму.

1. Главный агент системы начинает процесс формирования векторов потомственных и родительских групп.

2. Главный агент системы высылает запрос на предоставление локальных векторов всем членам своей родительской группы.

3. После получения локальных векторов главный агент формирует групповой ситуационный вектор своей родительской группы.

4. Групповой вектор родительской группы главного агента системы также является групповым вектором потомственной группы для всех непосредственных потомков главного агента.

5. Главный агент высылает всем своим прямым потомкам групповой вектор родительской группы, тем самым завершая формирование своих групповых векторов.

Остальные агенты системы при формировании групповых векторов работают по следующему алгоритму.

1. При получении запроса от агента-родителя на предоставление локального си-

туационного вектора агент обновляет свой ситуационный вектор и отправляет в ответ на запрос обновленный локальный вектор.

2. После получения группового вектора родительской группы агента-родителя агент формирует на его основе групповой вектор потомственной группы.

3. Агент высылает запрос на предоставление локальных векторов всем членам своей родительской группы.

4. После получения локальных векторов агент формирует групповой ситуационный вектор своей родительской группы.

Агент высылает всем своим прямым потомкам групповой вектор родительской группы, тем самым завершая формирование своих групповых векторов.

Важнейшую роль в процессе работы системы играют плановые векторы, посредством которых агент-родитель управляет своими потомками в родительской группе и, следовательно, системой в целом. Плановый вектор агента определяет планируемые параметры, т. е. параметры, которые агент-родитель хочет получить от своего агента-потомка, модифицируя его плановый вектор.

Плановые векторы на каждом уровне иерархии имеют различный формат. Приведем общий список параметров для планового вектора:

команда повышения скорости вращения ротора отдельной ВЭУ;
команда понижения скорости вращения ротора отдельной ВЭУ;
команда включения тэнов отдельного бойлера;
команда выключения тэнов отдельного бойлера;
команда остановки отдельной ВЭУ;
команда запуска отдельной ВЭУ;
команда принудительного заряда аккумулятора;
разрешение заряда аккумулятора.

На рис. 2 показана обобщенная схема иерархии системы.

Принципиально в структуре системы управления автономной ветроэлектростанцией можно выделить несколько сущностей:

центральное управляющее устройство;

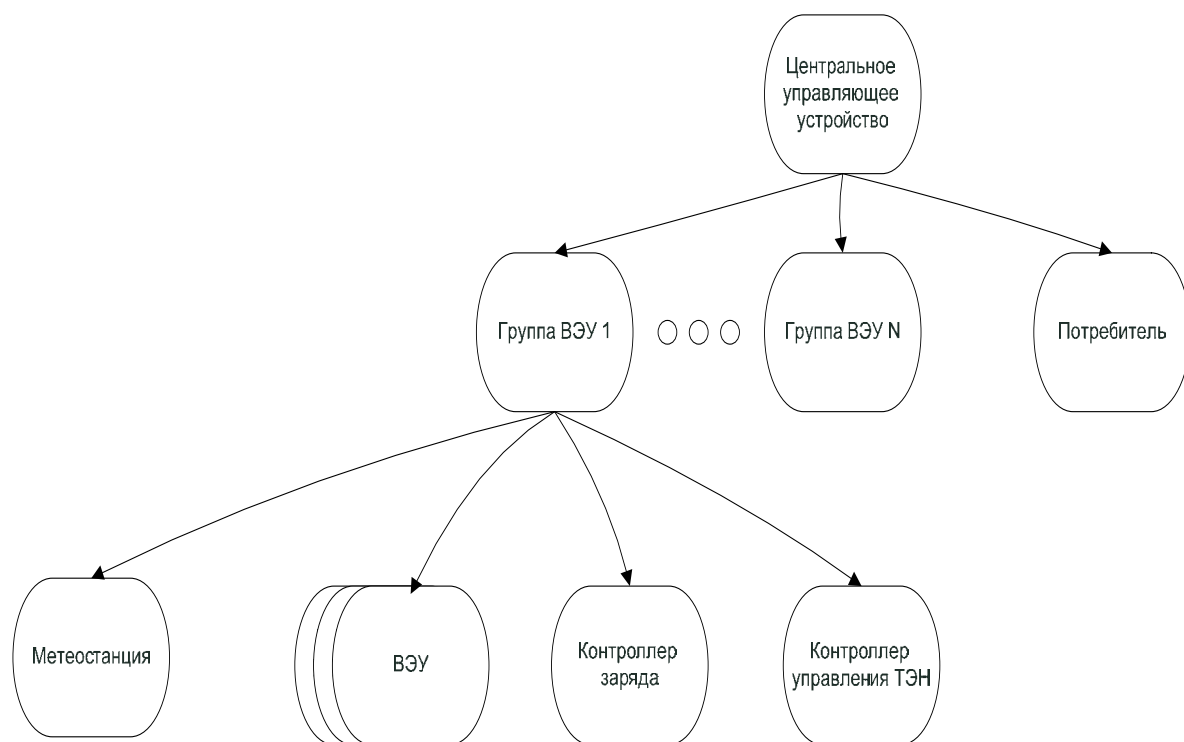


Рис. 2. Обобщенная схема иерархии системы

одна или несколько групп ВЭУ;
потребитель;
метеостанция;
ВЭУ;
контроллер заряда;
контроллер управления нагревательными элементами.

Каждая отдельная сущность в свою очередь может быть разделена на подграф, за пример возьмем центральное управляющее устройство. На рис. 3 показан подграф для центрального управляющего устройства.

Наиболее важным качеством алгоритма принятия решений с использованием системы обучения с подкреплением и сети адаптивной критики для системы управления ветроэлектростанцией является то, что существует возможность объединения экспертных знаний специалистов, эксплуатирующих станцию, с параметрами, полученными с сенсоров системы через сеть обработки событий. Для выполнения данных требований реализован алгоритм сети адаптивной критики с использованием нечеткого вывода, обеспечивающий возмож-

ность настройки состояний системы с использованием правил нечеткой логики.

В среде Matlab разработана математическая модель ветропарка, в которой для обеспечения выработки 100 кВт используются пять ветроустановок с синхронными генераторами номинальной мощностью по 20 кВт.

Для математической модели проведены испытания, показавшие следующие результаты:

при использовании контроллера с алгоритмом поддержания максимальной быстроходности увеличение вырабатываемой мощности при скорости ветра 10 м/с составило 53,8 %, а при скорости ветра 5 м/с составило 318 % в сравнении с работой автономной ВЭС при отсутствии регулирования;

при использовании алгоритма управления, учитывающего взаимовлияние ветроустановок, увеличение вырабатываемой мощности при скорости ветра 10 м/с составило 0,3 %, а при скорости ветра 5 м/с составило 0,8 % в сравнении с работой автономной ВЭС при использовании алго-

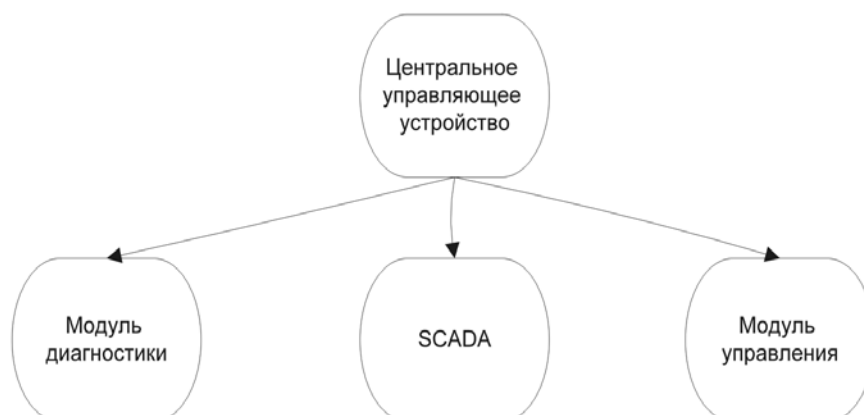


Рис. 3. Подграф для центрального управляющего устройства

ритма, при котором каждая ВЭУ стремится вырабатывать максимальную мощность.

Результаты показали эффективность разработанного алгоритма и целесообразность его практического применения.

Разработанный алгоритм управления обладает хорошими адаптивными качествами, использование алгоритма обучения с подкреплением позволяет быстро ввести в

эксплуатацию систему управления без длительного периода обучения, что характерно для классических алгоритмов управления с использованием нейронных сетей. Это позволяет сократить сроки интеграции системы в существующие ВЭС.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России», проект 2013-1.6-14-516-0112, ГК 14.516.11.0008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pandey, K.** Maximum power point tracking of wind energy conversion system with permanent magnet synchronous generator [Text] / K. Pandey, A. Tiwari // *Internat. J. of Engineering Research & Technology (IJERT)*. – 2012. – Vol. 1. – Iss. 5.
2. **Шкодырев, В.П.** Инновационные технологии в задачах управления большими распределенными системами [Текст] / В.П. Шкодырев // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – № 3-1(154). – С. 73–76.
3. **Johnson, K.** Wind farm control: addressing the aerodynamic interaction among wind turbines [Электронный ресурс] / K Johnson, T. Naveen // *American Control Conf.* – 2009.
4. **Marden, J.** A Model-Free Approach to Wind Farm Control Using Game Theoretic Methods [Электронный ресурс] / J. Marden S. Ruben, L. Pao // *IEEE Transactions On Control Systems Technology*. – Vol. 21. – № 4.
5. **van Dam, F.** A Maximum Power Point Tracking Approach for Wind Farm Control [Электронный ресурс] / F. van Dam, P. Gebräad, J.-W. van Wingerden // *Proc. of The Science of Making Torque from Wind conf.* Oldenburg, Germany, 9–11 Oct. 2012.
6. **Sorensen, Paul.** Wind Farm Control [Электронный ресурс] / Paul Sorensen, Jesper R. Kristoffersen // *ECPE Seminar – Renewable energies*. – 2006.
7. **Farh Hassan, M.** Fuzzy logic control of wind energy conversion system [Text] / Hassan M. Farh, Ali M. Eltamaly // *J. of Renewable and Sustainable Energy*. – 2013.
8. **Azouz, M.A.** Fuzzy Logic Control of Wind Energy Systems [Электронный ресурс] / M. Azouz, A. Shaltout M.A.L. Elshafei // *Proc. of the 14th Internat. Middle East Power Systems Conf. (MEPCON'10)*, Cairo Univ., Egypt, Dec. 19–21.
9. **Kyoungsoo, Ro.** Application of neural network controller for maximum power extraction of a grid-connected wind turbine system [Электронный ресурс] / Ro Kyoungsoo, Choi Han-ho // *Electrical Engineering*, 2005.
10. **Li, T.** Neural Network Compensation Control for Output Power Optimization of Wind Energy Conversion System Based on Data-Driven Control [Text] / T. Li, A. J. Feng, L. Zhao // *J. of Control*

Science and Engineering. – 2012.

11. **Bayat, M.** Wind Energy Conversion Systems Control Using Inverse Neural Model Algorithm

[Text] / M. Bayat, M. Sedighizadeh, A. Rezazadeh. // Internat. J. of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). – 2010.

REFERENCES

1. **Pandey K., Bayat M., Sedighizadeh M., Rezazadeh A.** Maximum power point tracking of wind energy conversion system with permanent magnet synchronous generator [Text] / Internat. J. of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2012. – Vol. 1. – Iss. 5.

2. **Shkodryev V.P.** Innovatsionnye tekhnologii v zadachakh upravleniya bol'shymi raspredelennymi sistemami / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie. – St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – № 3-1(154). – S. 73–76. (rus)

3. **Johnson K., Naveen T.** Wind farm control: addressing the aerodynamic interaction among wind turbines / American Control Conf., 2009.

4. **Marden J., Ruben S., Pao L.** A Model-Free Approach to Wind Farm Control Using Game Theoretic Methods / IEEE Transactions On Control Systems Technology. – Vol. 21. – № 4.

5. **van Dam F., Gebraad P., van Wingerden J.-W.** A Maximum Power Point Tracking Approach for Wind Farm Control / Proc. of The Science of Making Torque from Wind conf., Oct. 9-11, 2012, Oldenburg, Germany.

6. **Sorensen Paul, Kristoffersen Jesper R.** Wind Farm Control; ECPE Seminar – Renewable energies. – 2006.

7. **Farh Hassan M., Eltamaly Ali M.** Fuzzy logic control of wind energy conversion system / J. of Renewable and Sustainable Energy. – 2013.

8. **Azouz M., Shaltout A., Elshafei M.A.L.** Fuzzy Logic Control of Wind Energy Systems / Proc. of the 14th Internat. Middle East Power Systems Conf. (MEPCON'10), Cairo Univ., Egypt, Dec. 19–21.

9. **Kyoungsoo Ro, Han-ho Choi.** Application of neural network controller for maximum power extraction of a grid-connected wind turbine system / Electrical Engineering. – 2005.

10. **Li T., Feng A.J., Zhao L.** Neural Network Compensation Control for Output Power Optimization of Wind Energy Conversion System Based on Data-Driven Control / J. of Control Science and Engineering. – 2012.

11. **Bayat M., Sedighizadeh M., Rezazadeh A.** Wind Energy Conversion Systems Control Using Inverse Neural Model Algorithm / Internat. J. of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). – 2010.

ЛОГИНОВ Анатолий Леонидович – доцент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: a_loginov@inbox.ru

LOGINOV, Anatoly L. St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: a_loginov@inbox.ru

ПОТЕХИН Вячеслав Витальевич – доцент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: slava.potekhin@gmail.com

POTEKHIN, Vyacheslav V. St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: slava.potekhin@mail.ru

АКУЛОВ Дмитрий Вадимович – инженер кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: dmitryab87@ya.ru

AKULOV, Dmitrii V. St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: dmitryab87@ya.ru

ХРИТОНЕНКОВ Антон Константинович — аспирант кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: a.khritonenkov@gmail.com

KHRITONENKOV, Anton K. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: a.khritonenkov@gmail.com

ПОЛЕТАЕВ Иван Георгиевич — ассистент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: polivager@mail.ru

POLETAEV, Ivan G. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: polivager@mail.ru

ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ФУНКЦИЕЙ РЕЛАКСАЦИИ

I.G. Chernorutskiy

GRADIENT METHODS WITH EXPONENT RELAXATION FUNCTION

На основе аппарата функций релаксации рассмотрен новый класс матричных градиентных методов, обобщающий классические градиентные методы, методы Ньютона и методы Левенберга–Маркуардта. В отличие от классических прототипов, построенные методы сохраняют сходимость для невыпуклых задач нелинейного программирования в условиях высокой степени жесткости целевых функционалов.

ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ. ФУНКЦИИ РЕЛАКСАЦИИ. НЕВЫПУКЛЫЕ ЗАДАЧИ. ЖЕСТКИЕ ФУНКЦИОНАЛЫ. ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ.

New class of matrix gradient techniques is described on the basis of relaxation function apparatus. This class generalises classical gradient methods, Newtonian methods and Levenberg–Markwardt methods. Distinctive from classical, methods developed keep convergence for nonconvex problems of nonlinear programming in high stiffness of criterion functional conditions.

GRADIENT METHODS. RELAXATION FUNCTIONS. NON-CONVEX PROBLEMS. STIFF FUNCTIONALS. GRADIENT METHODS.

Для решения задачи безусловной минимизации

$$J(x) \rightarrow \min_x, x \in R^n, J \in C^2(R^n)$$

рассматривается класс матричных градиентных методов вида

$$x^{k+1} = x^k - H_k(A_k, h_k)J'(x^k), h_k \in R^1,$$

где $A_k = J''(x^k)$, H_k – матричная функция A_k .

Данный класс методов включает в себя как частные случаи такие классические процедуры, как градиентные методы наискорейшего спуска, методы Левенберга–Маркуардта, ньютоновские методы.

Систематическое изучение методов описываемого класса опирается на работы [1–7], а также на некоторые более ранние публикации автора. Далее представлен основанный на понятии функции релаксации [1, 6] подход к построению и анализу нетрадиционных градиентных методов с экспоненциальной функцией релаксации, обобщающих названные выше известные процедуры.

В соответствии с основными требованиями к функции релаксации [6] естественно рассмотреть экспоненциальную зависимость вида

$$R_h(\lambda) = R(\lambda) = \exp(-\lambda h), h > 0, \quad (1)$$

для которой условие релаксационности выполняется при любых значениях параметра h . Кроме того, реализуется предельное соотношение [1, 6]

$$R_h(\lambda) \rightarrow 1, (h \rightarrow 0),$$

что позволяет эффективно регулировать норму $\|x^{k+1} - x^k\|$ вектора продвижения независимо от расположения спектральных составляющих матрицы G_k на вещественной оси λ .

Легко видеть, что функция (1) обобщает (по сути – порождает) многие известные функции релаксации и является в определенном смысле канонической (или оптимальной). Действительно, разлагая экспоненту (1) в ряд Тейлора и ограничиваясь двумя первыми членами разложения, получим

$$\begin{aligned}\exp(-\lambda h) &= 1 / \exp(\lambda h) \cong \\ &\cong 1 / (1 + \lambda h) = h' / (h' + 1), h' = 1 / h,\end{aligned}$$

что совпадает с функцией релаксации метода Левенберга–Маркуардта [6]. И аналогично, полагая

$$\exp(-\lambda h) \cong 1 - \lambda h,$$

приходим к классическому градиентному методу с постоянным шагом. Для достаточно больших значений параметра h имеем $\exp(-\lambda h) \cong 0$ при любых $\lambda \geq m > 0$, что позволяет говорить о вырождении метода в классический метод Ньютона без регуляции шага.

Указанные связи между различными методами могут быть установлены также исходя из *непрерывного принципа* построения оптимизирующих алгоритмов. Согласно этому принципу для минимизируемого функционала $J(x)$ строится дифференциальное уравнение *траектории наискорейшего спуска* вида [1]:

$$\frac{dx}{dt} = -J'(x), \quad x(0) = x_0.$$

Решая это уравнение различными методами численного интегрирования, приходим к соответствующим процедурам минимизации. В этом случае легко проверить, что такие простейшие методы численного анализа, как метод ломаных Эйлера и неявный метод ломаных [5] приведут к основным соотношениям классического градиентного метода с постоянным шагом и метода Левенберга–Маркуардта соответственно. Аналогично можно установить, что градиентные методы с экспоненциальной функцией релаксации эквивалентны т. н. *системным методам* численного интегрирования [5].

По экспоненциальной функции релаксации может быть построен соответствующий матричный множитель H_k , определяющий конкретную схему матричной градиентной процедуры.

Действительно, имеем

$$\lambda H(\lambda, h) = 1 - R(\lambda) = 1 - \exp(-\lambda h).$$

Полагая $\lambda \neq 0$, получим

$$\begin{aligned}H(\lambda, h) &= \lambda^{-1} [1 - \exp(-\lambda h)] = \\ &= \int_0^h \exp(-\lambda \tau) d\tau.\end{aligned}\quad (2)$$

Доопределяя $H(0, h)$ в точке $\lambda = 0$ из условия непрерывности, получим $H(0, h) = h$. В результате схема *метода с экспоненциальной релаксацией* (*ЭР-метода*) примет вид

$$x^{k+1} = x^k - H(G_k, h_k) J'(x^k), \quad (3)$$

$$H(G, h) = \int_0^h \exp(-G\tau) d\tau. \quad (4)$$

Параметр h_k определяется равенством

$$h_k \in \text{Arg min}_{h \geq 0} J[x^k - H(G_k, h) J'(x^k)], \quad (5)$$

однако возможны и другие способы выбора h_k .

Принципиальная схема ЭР-метода была получена исходя из анализа локальной квадратичной модели минимизируемого функционала. Представляет интерес выяснение возможностей метода в глобальном смысле, без учета предположений о квадратичной структуре $J(x)$.

Можно доказать, что алгоритм (3), (4) сходится практически при тех же ограничениях на минимизируемый функционал, что и метод наискорейшего спуска [1], имея в определенных условиях существенно более высокую скорость сходимости.

Следующая теорема устанавливает факт сходимости ЭР-метода для достаточно широкого класса невыпуклых функционалов в предположении достижимости точки минимума (условие 2) и отсутствия точек локальных минимумов (условие 3) [5]. Обозначим $g(x) = J'(x)$, $g_k = J'(x^k)$.

Теорема 1. Пусть

- 1) $J(x) \in C^2(R^n)$;
- 2) множество $X_* = \{x^* / J(x^*) = \min J(x)\}$ непусто;
- 3) для любого $\varepsilon > 0$ найдется такое $\delta > 0$, что $\|g(x)\| \geq \delta$, если $x \notin S(X_*)$, где

$$S(X_*) = \{x / d(x, X_*) \leq \varepsilon\},$$

$$d(x, X_*) = \min_{x^* \in X_*} \|x - x^*\|;$$

- 4) для любых $x, y \in R^n$

$$\|g(x + y) - g(x)\| \leq l \|y\|, \quad l > 0;$$

5) собственные числа матрицы $G(x)$ заключены в интервале $[-M, M]$, где $M > 0$ не зависит от x .

Тогда независимо от выбора начальной точки x^0 для последовательности $\{x^k\}$, построенной согласно (3), (4), выполняются предельные соотношения

$$\lim d(x^k, X_*) = 0, \quad (6)$$

$$\lim J(x^k) = J(x^*), \quad k \rightarrow \infty. \quad (7)$$

Доказательство. Используя соотношения

$$J(x+y) = J(x) + \int_0^1 \langle g(x+\vartheta y), y \rangle d\vartheta,$$

$$\left| \int_0^1 \langle x(\vartheta), y(\vartheta) \rangle d\vartheta \right| \leq \int_0^1 \|x(\vartheta)\| \cdot \|y(\vartheta)\| d\vartheta$$

и обозначая $J_k = J(x^k)$, $g_k = J'(x^k)$, $G_k = J''(x^k)$, получим

$$\begin{aligned} J_k - J[x^k - H(G_k, h)g^k] &= \\ &= \int_0^1 \langle g[x^k - \vartheta H(G_k, h)g^k], H(G_k, h)g^k \rangle d\vartheta = \\ &= \langle H(G_k, h)g^k, g^k \rangle - \\ &- \int_0^1 \langle g^k - J[x^k - \vartheta H(G_k, h)g^k], \\ &H(G_k, h)g^k \rangle d\vartheta \geq \langle H(G_k, h)g^k, g^k \rangle - \\ &- l \|H(G_k, h)g^k\|^2 \int_0^1 \vartheta d\vartheta = \langle H(G_k, h)g^k, g^k \rangle - \\ &- \frac{l}{2} \|H(G_k, h)g^k\|^2 \geq \rho \|g^k\|^2 - \\ &- \frac{l}{2} \|g^k\|^2 R^2 = \alpha \|g^k\|^2, \\ \alpha &\triangleq \rho - (l/2)R^2. \end{aligned} \quad (8)$$

При этом использованы неравенства

$$\rho \|y\|^2 \leq \langle H(G_k, h)y, y \rangle \leq R \|y\|^2, \quad (9)$$

где ρ , R — соответственно минимальное и максимальное собственные числа положительно определенной матрицы $H(G_k, h)$.

Левое неравенство (9) следует из представления минимального собственного числа λ любой симметричной матрицы B в виде $\lambda = \min_{x \neq 0} \frac{\langle Bx, x \rangle}{\langle x, x \rangle}$, а правое — из условия согласования $\|Bx\| \leq \|B\| \cdot \|x\|$ сфери-

ческой нормы вектора $\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$ и спектральной нормы симметричной матрицы $\|B\| = \max_i |\lambda_i(B)|$, где $\lambda_i(B)$, $i \in [1: n]$ — собственные числа матрицы B . Для значений ρ и R получим:

$$\begin{aligned} \rho &= \min_i \lambda_i[H(G, h)] = \\ &= \min_i \int_0^h \exp[-\lambda_i(G)\tau] d\tau, \quad R = \\ &= \max_i \int_0^h \exp[-\lambda_i(G)\tau] d\tau. \end{aligned}$$

Согласно пятому предположению имеем

$$\begin{aligned} \int_0^h \exp(-M\tau) d\tau &\leq \\ &\leq \int_0^h \exp[-\lambda_i(G)\tau] d\tau \leq \int_0^h \exp(M\tau) d\tau, \end{aligned}$$

поэтому

$$\begin{aligned} \rho &\geq \int_0^h \exp(-M\tau) d\tau = M^{-1}[1 - \exp(-Mh)], \\ R &\leq \int_0^h \exp(M\tau) d\tau = M^{-1}[\exp(Mh) - 1], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \rho - \frac{l}{2} R^2 \geq \\ &\geq M^{-1}[1 - \exp(-Mh)] - \frac{l}{2M^2} [\exp(Mh) - 1]^2. \end{aligned}$$

Полагая $h = 1/M$ и считая без ограничения общности, что $M > l e(e-1)/2$, где e — основание натуральных логарифмов, получим

$$\alpha \geq (e-1)[2M - l e(e-1)] / (2M^2 e) > 0. \quad (10)$$

Из (5), (8), (10) следует

$$\begin{aligned} J_k - J_{k+1} &\geq J_k - \\ -J[x^k - H(G_k, M^{-1})g^k] &\geq \alpha \|g^k\|^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Следовательно, последовательность $\{J_k\}$ является монотонно невозрастающей и ограниченной снизу величиной $J(x^*)$, поэтому она имеет предел и $J_{k+1} - J_k \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$. Из (11) следует $\|g^k\|^2 \leq \alpha^{-1}(J_k - J_{k+1})$, поэтому $\|g^k\| \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$. А так как по условию $\|g^k\| \geq \delta$ при $x^k \in S(X_*)$, то найдется такой номер N , что $x^k \in S(X_*)$ при $k \geq N$ и, следовательно, справедливо утверждение (6).

Обозначим через $\bar{x}^k$ проекцию x^k на множество X_* . Тогда по теореме о среднем

$$J_k - J(\bar{x}^k) = \langle g(x^{kc}), x^k - \bar{x}^k \rangle,$$

где $x^{kc} = \bar{x}^k + \lambda_k(x^k - \bar{x}^k)$, $\lambda_k \in [0, 1]$.

Учитывая, что $g(\bar{x}^k) = 0$, получим

$$J_k - J(\bar{x}^k) = \langle g(x^{kc}) - g(\bar{x}^k), x^k - \bar{x}^k \rangle \leq \|g(x^{kc}) - g(\bar{x}^k)\| \cdot \|x^k - \bar{x}^k\| \leq ld^2(x^k, X_*).$$

И в силу (6) получаем (7). Теорема доказана.

Замечание 1. Утверждения теоремы, очевидно, выполняются, если h_k выбирать не из условия (5), а из условия

$$J[x^k - H(G_k, h_k)g^k] = \min_{h \in [0, \bar{h}]} J[x^k - H(G_k, h)g^k],$$

где $\bar{h} > 0$ — произвольное число. Действительно, легко видеть, что равенство (11) только усилится, если брать любое другое значение h_1 (может быть, даже большее, чем $2/[le(e-1)]$) с меньшим значением функционала, чем при $h = 1/M$, и в то же время, если при $h = 1/M$ сходимость имеет место, то она сохраняется и при меньших значениях h . Последнее следует из возможности выбора сколь угодно больших значений M при установлении сходимости.

Замечание 2. Утверждения (6), (7) сохраняются также при замене условия (5) на следующее:

$$J_{k+1} = J[x^k - H(G_k, h_k)g^k] \leq (1 - \gamma_k)g^k + \gamma_k \min_{h>0} J[x^k - H(G_k, h)g^k], 0 < \gamma < \gamma_k \leq 1. \quad (12)$$

Действительно, из (12) будем иметь

$$J_k - J_{k+1} \geq \gamma_k (J_k - \min_{h>0} J[x^k - H(G_k, h)g^k]) \geq \gamma_k (J_k - J[x^k - H(G_k, h)g^k])$$

и, согласно (8),

$$J_k - J_{k+1} \geq \gamma_k \alpha \|g^k\|^2 = \bar{\alpha} \|g^k\|^2, \bar{\alpha} > 0.$$

Получено неравенство, аналогичное (11), и далее доказательство проводится по той же схеме, с заменой α на $\bar{\alpha}$.

В случае сильной выпуклости функционала $J(x)$, удастся получить оценку скорости сходимости.

Теорема 2. Пусть

- 1) $J(x) \in C^2(R^n)$;
- 2) для любых $x, y \in R^n$ выполняются условия

$$\lambda \|y\|^2 \leq \langle G(x)y, y \rangle \leq \Lambda \|y\|^2,$$

$$\|G(x+y) - G(y)\| \leq L\|x\|, \lambda > 0, L \geq 0.$$

Тогда независимо от выбора начальной точки x^0 для метода (3) справедливы соотношения (6), (7), и оценка скорости сходимости

$$\|x^{k+1} - x^*\| \leq (\Lambda/\lambda)^{1/2} L \|x^k - x^*\|^2 / (2\lambda).$$

Доказательство содержится в [1, 5].

Таким образом, установлена квадратичная скорость сходимости, характерная для H -методов.

Реализация методов с экспоненциальной релаксацией

Алгоритм вычисления матричных функций (4) может быть основан на использовании известного рекуррентного соотношения [5]:

$$H(G, 2h) = H(G, h)[2E - GH(G, h)]. \quad (13)$$

Так как все рассматриваемые матричные функции симметричны и, следовательно, обладают простой структурой, то для доказательства (13) достаточно проверить его для соответствующих скалярных зависимостей, что тривиально.

Формула (13) используется также для получения обратной матрицы G^{-1} , т. к. выполняется предельное соотношение:

$$\lim H(G, h) = G^{-1}, h \rightarrow \infty.$$

Этот факт еще раз указывает на связь ЭР-метода с методом Ньютона, который является предельным вариантом рассматриваемого алгоритма при условии положительной определенности матрицы G . Практический выбор параметра h при известной матрице G или ее аппроксимации может осуществляться различными способами. В каждом из них приближенно реализуется соотношение (5). Наиболее простой прием заключается в следующем.

Задаются некоторой малой величиной h_0 такой, что матрица $H(G_k, h_0)$ может быть за-

менена отрезком соответствующего степенного ряда:

$$H(G_k, h_0) \cong h_0 \sum_{i=1}^l (-G_k h_0)^{i-1} / i! \quad (14)$$

Далее последовательно наращивают h с помощью соотношения (13), вычисляя каждый раз значение $J[x^k - H(G_k, 2^q h_0) J'_k]$, $q = 0, 1, \dots$.

Процесс продолжается до тех пор, пока функция J убывает либо достаточно быстро убывает. Точка с минимальным значением J принимается за x^{k+1} . При этом вместо точной реализации соотношения (5) оптимальный шаг выбирается на дискретной сетке значений $h_q = 2^q h_0$, $q = 0, 1, \dots$. Как правило, предельное значение q не превышает 30–40. В самом деле, если функционал $J(x)$ квадратичный и $G(x) > 0$, то оптимальное значение параметра $h = +\infty$, $q = +\infty$, а $H(G_k, h) = G_k^{-1}$, и метод вырождается в классический вариант метода Ньютона без регулировки шага. Однако в действительности при использовании (13) для построения матрицы $H(G_k, h)$ необходимое число итераций q оказывается конечной величиной, ибо все вычисления проводятся с ограниченной точностью, и процесс автоматически останавливается при попадании результата в достаточно малую окрестность решения. Количество обращений к рекуррентному соотношению (13) при этом оказывается сравнительно небольшим, что подтверждается опытом практического применения (13) в качестве алгоритма построения обратной матрицы.

Сказанное подтверждается следующими рассуждениями для случая $G > 0$.

Соотношение (13) может быть преобразовано к виду $E - GH(G, 2h_0) = [E - GH(G, h_0)]^2$.

Из равенств $\|E - GH(G, h_0)\| = \|\exp(-h_0 G)\| = \exp(-mh_0)$, при $h_0 = 0, 1/M$, где $m = \min_i \lambda_i(G)$, $M = \max_i \lambda_i(G)$ следует, что $\|E - GH(G, h_0)\| = \exp(-0, 1m/M)$.

Поэтому

$$E - GH(G, 2^q h_0) = (E - GH(G, h_0))^{2^q}$$

и

$$\|E - GH(G, 2^q h_0)\| \leq$$

$$\leq \|E - GH(G, h_0)\|^{2^q} = \exp\left(-0, 1 \cdot 2^q \frac{m}{M}\right).$$

Необходимое число итераций q можно определять из условия выполнения с машинной точностью равенства $\|E - GH(G, 2^q h_0)\| = 2^{-t}$, где t — длина разрядной сетки мантииссы в представлении числа в форме с плавающей точкой. Или, что то же самое, из условия $\exp(-0, 1 \cdot 2^q m/M) = 2^{-t}$.

Полагая, например, $t = 28$, $\eta = M/m = 10^8$, получим, что

$$q \cong \ln\left(10 \frac{t \ln 2M}{m}\right) / \ln 2 \cong 34.$$

Таким образом, показано, что максимальное число итераций при реализации соотношения (13) зависит от степени овражности η и обычно не превышает указанных выше значений.

В целом ряде случаев более эффективной оказывается реализация метода с элементами адаптации, в которой значение J не вычисляется для всех промежуточных значений q . Функционал вычисляется для трех значений q : $q^* - 1$, q^* , $q^* + 1$ с последующим выбором лучшего значения. Здесь q^* — оптимальное значение q , полученное на предыдущей итерации по k . На первой итерации для определения q^* необходимо вычислить весь ряд значений J .

С целью более точной локализации минимума на каждом шаге по k могут использоваться процедуры одномерного поиска по h . Например, известный *метод золотого сечения*. Для этого вначале изложенным выше грубым способом определяется промежуток $[h_{\min}, h_{\max}]$, содержащий оптимальное в смысле (5) значение h_* . Далее полагаем

$$\varphi(h) \triangleq J[x^k - H(G_k, h)g^k].$$

Тогда

$$h_{\min} = 2^q h_0, h_{\max} = 2^{q+2} h_0, h_* = 2^{q+1} h_0,$$

причем предполагается, что

$$\varphi(h_{\min}) > \varphi(h_*), \varphi(h_{\max}) > \varphi(h_*).$$

Фиксируя число пересчетов q' , получим, что выбирая новый параметр h'_0 из промежутка $h'_0 \in [h_0, 4h_0]$, где h_0 — первоначально выбранное значение, мы получим

$h = 2^q h'_0 \in [h_{\min}, h_{\max}]$.

Далее можно определить $\varphi(h) = \varphi(2^q h'_0) = \Psi(h'_0)$, и задача сводится к стандартной задаче минимизации функции одной переменной $\Psi(h'_0)$ на заданном промежутке.

Для приближенного вычисления матрицы G_k вторых производных могут применяться различные методы [1]. Рассмотрим наиболее универсальный алгоритм, основанный на конечноразностных соотношениях. В результате вычислений по известным формулам с двусторонними приращениями приходим к матрице $G_k = D_k / \beta_k^2$ и вектору $g^k = d^k / \beta_k$, где $\beta_k = 2s_k$, s_k — шаг дискретности. Как уже говорилось, производить деление матрицы D_k на β_k^2 или вектора d_k на β_k с целью получения G_k и g^k нецелесообразно с вычислительной точки зрения. Поэтому далее принципиальная схема ЭР-метода будет преобразована к виду, удобному для непосредственного применения D_k и d_k вместо G_k и g^k .

Имеем

$$H(D_k, h) = \int_0^h \exp(-D_k \tau) d\tau = \beta_k^{-2} \int_0^h \exp(-G_k \beta_k^2 \tau) d\beta_k^2 \tau = \beta_k^{-2} \int_0^{\beta_k^2 h} \exp(-G_k t) dt,$$

или

$$\beta_k^2 H(\beta_k^2 G_k, h) = H(G_k, h_k), \quad h_k = \beta_k^2 h. \quad (15)$$

С учетом (15) основное соотношение (3) приводится к виду

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k - H(G_k, h_k) g^k = \\ &= x^k - \beta_k^2 H(D_k, h_k / \beta_k^2) d^k / \beta_k = \\ &= x^k - 2s_k H(D_k, h) d^k, \quad h = h_k / 4s_k^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Имеем также $H(D_k, 2h) = H(D_k, h) \times [2E - D_k H(D_k, h)]$.

Оптимальное значение h находится непосредственно из соотношения

$$J(x^{k+1}) = \min_{h>0} J[x^{k+1} - 2s_k H(D_k, h) d^k].$$

При использовании разностного уравнения (16) укрупненная вычислительная схема метода с экспоненциальной релаксацией может быть сведена к следующей последовательности действий.

Алгоритм МЭР

Шаг 1. Ввести исходные данные x^0, s .

Шаг 2. Принять $x := x^0$; $J := J(x)$; $x' := x$; $J_l := J$.

Шаг 3. Вычислить матрицу $D = \{D_{ij}\}$ и вектор $d = \{d_j\}$ в точке x по формулам

$$\begin{aligned} D_{ij} &= J(x + se_i + se_j) - \\ &\quad - J(x - se_i + se_j) - \\ &\quad - J(x + se_i - se_j) + J(x - se_i - se_j), \\ &\quad i, j \in [1: n]; \end{aligned} \quad (17)$$

$$d_i = J(x + se_i) - J(x - se_i), \quad (18)$$

$$i \in [1: n], \quad e_i = (0, \dots, 1, \dots, 0);$$

принять $h_0 := 0,1 / \|D\|$.

Шаг 4. Принять $k = 0$. Вычислить матрицу $H = H(D, h_0)$

$$H = \sum_{i=1}^7 (-D)^{i-1} h_0^i / i!. \quad (19)$$

Шаг 5. Положить $x' := x - 2sHd$; $J_l := J(x')$; $k := k + 1$.

Шаг 6. Если $J_l < J_p$, положить $x' := x'$, $J_l := J_r$.

Шаг 7. Если $k > 20$, перейти к шагу 8; в противном случае положить $H := H(2E - DH)$ и перейти к шагу 5;

Шаг 8. Проверить условия окончания процесса оптимизации в целом; если они выполняются, остановить работу алгоритма; в противном случае положить $x := x'$, $J := J_l$ и перейти к шагу 3.

Заметим, что выбор на шаге 3 параметра $h_0 := 0,1 / \|D\|$ эквивалентен при $G = J''(x)$ равенству $h_0 := 0,1 / \|G\|$ в исходной схеме алгоритма. А последнее равенство гарантирует убывание функционала:

$$J[x^k - H(G_k, h_0)g^k] < J(x^k). \quad (20)$$

Действительно, как было сказано ранее, для выполнения неравенства (20) достаточно положить $h_0 \leq 1/M$, где $M > le(e - 1) / 2 \cong 2,3l$. Для параболоида, аппроксимирующего $J(x)$ в окрестности точки x , имеем $l = \|G\|$, где $G = J''(x)$. Поэтому можно выбрать h_0 из условия

$$h_0 = \frac{1}{2,3\|G\|} \cong \frac{0,4}{\|G\|}.$$

Замена коэффициента 0,4 на 0,1 позво-

ляет более точно реализовать шаг 4 алгоритма, одновременно гарантируя выполнение (20).

Параметр s_k может меняться в зависимости, например, от величины $\|x^k - x^{k-1}\|$.

Возможны и другие способы регулирования шага.

Области применения и анализ влияния погрешностей

Обратимся к анализу влияния погрешностей вычислений при реализации ЭР-методов.

Рассмотрим итерационный процесс, определяемый рекуррентным соотношением:

$$x^{k+1} = x^k - H_k(G_k, h_k)G_k x^k = q(G_k)x^k, \quad (21)$$

где $q(G) = E - H(G, h)G$. Данный процесс является упрощенной моделью ЭР-метода, характеризуя его локальные свойства. Здесь предполагается, что ищется минимум квадратичной формы $f(x) = 1/2 \langle G_k x, x \rangle$.

Оценим влияние погрешностей в представлении матрицы G_k на характеристики релаксационности последовательности $\{f(x^k)\}$.

Кроме предположения о квадратичном характере $J(x)$ в окрестности точки x^k мы неявно ввели еще одно допущение. Именно, заменяя в (21) матрицу G_k на возмущенную матрицу $G + dG$ (индекс k у матрицы далее будем опускать), мы предполагаем, что ошибки в вычислении G и g определенным образом согласованы. В действительности эквивалентное возмущение dG у матрицы, определяющей величину градиента Gx^k , может не совпадать с возмущением матрицы G , так как g и G вычисляются раздельно. Однако с позиций последующего анализа данное отличие не является принципиальным.

Предположим, что собственные числа матрицы G разделены на две группы:

$$\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{n-r} \gg |\lambda_{n-r+1}| \geq \dots \geq |\lambda_n|. \quad (22)$$

Возмущение dG матрицы G приводит к появлению возмущений $d\lambda_i$ для собственных чисел и возмущений dw^i для отвечающих им собственных векторов. Согласно результатам [1] будем считать, что вариации

собственных векторов происходят в пределах линейных оболочек

$$M_1 = \sum_{i=1}^{n-r} \alpha_i u^i, \quad M_2 = \sum_{j=n-r+1}^n \alpha_j u^j,$$

порожденных собственными векторами $\{u^i, i \in [1: n-r]\}$, $\{u^j, j \in [n-r+1, n]\}$ исходной невозмущенной матрицы G . В данном случае матрицы G и $G + dG$ одновременно не приводятся к главным осям, что вносит дополнительный элемент сложности в анализ влияния погрешностей.

Пусть

$$U^T G U = \text{diag}(\lambda_i), \quad U = (u^1, u^2, \dots, u^n); \quad (23)$$

$$W^T (G + dG) W = \text{diag}(\lambda_i + d\lambda_i),$$

$$W = (w^1, w^2, \dots, w^n).$$

Имеем теперь

$$q(G) = E - W D_1 W^T W D_2 W^T = E - W D_3 W^T,$$

где

$$D_1 = \text{diag} \left[\int_0^h \exp((-\lambda_i - d\lambda_i)\tau) d\tau \right];$$

$$D_2 = \text{diag}(\lambda_i + d\lambda_i); \quad D_3 = D_1 D_2.$$

Таким образом, матрица $q(G)$ имеет собственные векторы w^i и соответствующие им собственные числа $\lambda_i(q) = 1 - \lambda_i(D_3)$.

Полагая

$$x^k = \sum_{i=1}^n \xi_{i,k} w^i, \quad w^i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ji} u^j,$$

получаем

$$f(x^k) = 0,5 \langle G x^k, x^k \rangle = 0,5 \sum_{i=1}^n \xi_{i,k}^2 \left(\sum_{j=1}^n \alpha_{ji} \right)^2 \lambda_i.$$

Аналогично имеем

$$x^{k+1} = q(G) x^k = \sum_{i=1}^n \xi_{i,k} \lambda_i(q) w^i = \sum_{i=1}^n \xi_{i,k+1} w^i;$$

$$\begin{aligned} f(x^{k+1}) &= 0,5 \sum_{i=1}^n \xi_{i,k+1}^2 \left(\sum_{j=1}^n \alpha_{ji} \right)^2 \lambda_i = \\ &= 0,5 \sum_{i=1}^n \xi_{i,k}^2 \left(\sum_{j=1}^n \alpha_{ji} \right)^2 \lambda_i \lambda_i^2(q), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \lambda_i(q) &= 1 - (\lambda_i + d\lambda_i) \int_0^{h_k} \exp((-\lambda_i - d\lambda_i)\tau) d\tau = \\ &= \exp((-\lambda_i - d\lambda_i)h_k). \end{aligned} \quad (24)$$



Для выполнения неравенства $f(x^{k+1}) \leq f(x^k)$ согласно результатам [6] должны выполняться условия релаксационности:

$$|\lambda_i(q)| \leq 1, \lambda_i > 0; |\lambda_i(q)| \geq 1, \lambda_i < 0. \quad (25)$$

Теперь легко видеть, что если возмущение $d\lambda_i$ таково, что собственное число меняет знак

$$\text{sign}(\lambda_i) \neq \text{sign}(\lambda_i + d\lambda_i), \quad (26)$$

то условия (25), вообще говоря, нарушаются. Это приводит к резкому замедлению сходимости процесса оптимизации.

Пусть вариация dG матрицы G вызывается только погрешностями округления. Тогда неравенство (26) невозможно, если все малые собственные числа ограничены снизу величиной $n\lambda_i\varepsilon_M$. Действительно, в этом случае $\text{sign}(\lambda_i) = \text{sign}(\lambda_i + d\lambda_i)$, так как $|d\lambda_i| \leq n\lambda_i\varepsilon_M \leq |\lambda_i|$. Отсюда имеем следующее ограничение на степени жесткости [4] функционалов, эффективно минимизируемых ЭР-методами:

$$\eta(x^k) \leq 1/(n\varepsilon_M). \quad (27)$$

Проведенный анализ показывает, что вычислительные погрешности при достаточно больших значениях η могут приводить к практически случайному характеру множителей релаксации для малых собственных чисел, что определяет резкое снижение эффективности метода. Из (27) следует, что трудности возрастают при увеличении размерности n решаемой задачи и уменьшении длины разрядной сетки компьютера. Вычисления с двойной точностью, обычно реализуемые в современных вычислительных системах, приводят к оценке $\eta(x^k) \leq 1/(n\varepsilon_M^2)$ и позволяют решать существенно более широкий класс задач.

Опыт практического применения алгоритмов типа МЭР показал перспективность разрабатываемого подхода для решения жестких невыпуклых оптимизационных задач при условии достаточно точной аппроксимации целевого функционала квадратичными необязательно выпуклыми параболоидами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Черноруцкий, И.Г.** Методы оптимизации. Компьютерные технологии [Текст] / И.Г. Черноруцкий. —СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 384 с.
2. **Черноруцкий, И.Г.** Методы параметрической оптимизации в задачах идентификации [Текст] / И.Г. Черноруцкий //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. —СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. —№ 2(76). —С. 151–156.
3. **Черноруцкий, И.Г.** Параметрические методы синтеза систем управления [Текст] / И.Г. Черноруцкий //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. —СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. —№ 2(76). —С. 111–115.
4. **Черноруцкий, И.Г.** Алгоритмические проблемы жесткой оптимизации [Текст] / И.Г. Черноруцкий //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. —СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. —№ 6(162). —С. 141–152.

мости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. —СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. —№ 6(162). —С. 141–152.

5. **Ракитский, Ю.В.** Численные методы решения жестких систем [Текст] / Ю.В. Ракитский, С.М. Устинов, И.Г. Черноруцкий. —М.: Наука, 1979. — 208 с.

6. **Черноруцкий, И.Г.** Функции релаксации градиентных методов [Текст] / И.Г. Черноруцкий //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. —СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. —№ 3(150). —С. 66–72.

7. **Черноруцкий, И.Г.** Некоторые стандартные схемы параметрической оптимизации [Текст] / И.Г. Черноруцкий //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Изд-во Политехн. ун-та, 2012. —№ 6(162). —С. 128–133.

REFERENCES

1. **Chernorutskii I.G.** Metody optimizatsii. Komp'yuternye tekhnologii. — St-Petersburg: BKhV-Petersburg, 2011. — 384 s. (rus)
2. **Chernorutskii I.G.** Metody parametriceskoi optimizatsii v zadachakh identifikatsii / Nauchno-

tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2009. —№ 2(76). —S. 151–156. (rus)

3. **Chernorutskii I.G.** Parametriceskie

metody sinteza sistem upravleniia / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2009. — № 2(76). — S. 111–115. (rus)

4. **Chernorutskii I.G.** Algoritmicheskie problemy zhestkoi optimizatsii / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. — № 6(162). — S. 141–152. (rus)

5. **Rakitskii Iu.V., Ustinov S.M., Chernorutskii I.G.** Chislennye metody resheniia zhestkikh sistem.

— Moscow: Nauka, 1979. — 208 s. (rus)

6. **Chernorutskii I.G.** Funktsii relaksatsii gradientnykh metodov / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. — № 3(150). — S. 66–72. (rus)

7. **Chernorutskii I.G.** Nekotorye standartnye skhemy parametriceskoi optimizatsii / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. — № 6(162). — S. 128–133. (rus)

ЧЕРНОРУЦКИЙ Игорь Георгиевич — директор Института информационных технологий и управления, заведующий кафедрой информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

E-mail: director@icc.spbstu.ru

CHERNORUTSKIY, Igor G. St. Petersburg State Polytechnical University.

195251, Politechnicheskaya Str. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: director@icc.spbstu.ru



УДК 621.311:621.318

В.Г. Кучинский, Е.Н. Попков, В.М. Чайка

УПРАВЛЯЕМЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ

V.G. Kuchinsky, E.N. Popkov, V.M. Chayka

CONTROL CURRENT INVERTER FOR VARIABLE SPEED DRIVE MOTORS

Рассмотрены некоторые схемы преобразователей частоты для систем питания вентильных двигателей с постоянными магнитами. Наибольшее внимание уделено схемам на основе автономных инверторов тока, обеспечивающих возможность искусственной коммутации инвертора. Рассмотрены особенности процесса коммутации фазного тока статорной обмотки двигателя в зависимости от топологий применяемых схем. Даны рекомендации по выбору той или иной схемы.

ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ. АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР ТОКА. ИСКУССТВЕННАЯ КОММУТАЦИЯ ФАЗНОГО ТОКА.

The frequency converter schemes for power supply systems of the variable speed motors with permanent magnets are overviewed in the paper. Mostly the schemes of the autonomic current inverters with the artificial phase current switching are analyzed. The different aspects of the current switching process depending of the scheme topology are studied. The recommendations to choose the real scheme of the frequency converter were elaborated.

VARIABLE DRIVE MOTOR. PERMANENT MAGNET. FREQUENCY CONVERTER. AUTONOMIC CURRENT INVERTER. ARTIFICIAL PHASE CURRENT SWITCHING.

В силовых регулируемых электроприводах на основе вентильных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов используются преобразователи частоты как на основе инверторов напряжения (АИН), так и на основе инверторов тока (АИТ). В том случае, когда необходимо получить предельные удельные характеристики машины (например, максимальную мощность на единицу массы), преобразователи частоты должны не только обеспечивать частоту фазного тока, равную частоте ЭДС машины, но и задавать оптимальный фазовый угол между током и ЭДС.

Схемы преобразователей частоты на основе АИТ являются более сложными, чем на основе АИН, и требуют применения дросселя в цепи постоянного тока с индуктивностью, превосходящей индуктивность фазных обмоток. Вместе с тем преобразователи на основе АИТ имеют ряд преимуществ, основными из которых являются:

исключение высокочастотных пульса-

ций как в напряжении, так и в токе обмотки, что позволяет снизить потери в машине и улучшить виброакустические характеристики;

упрощение регулирования режимами работы машины, в частности, не требуется математических моделей машины;

обеспечение более устойчивой работы машины при возникновении каких-либо возмущений со стороны нагрузки.

Снижение пульсаций фазного тока при использовании АИН возможно за счет использования топологии многоуровневых АИН, что требует применения сложных многообмоточных входных трансформаторов и усложняет алгоритмы управления. При этом максимальная рабочая частота ШИМ АИН ограничена уровнем 1–3 кГц из-за значительного уровня динамических потерь в мощных высоковольтных IGBT-транзисторах (потери на включение и отключение).

Использование схем АИТ с естествен-

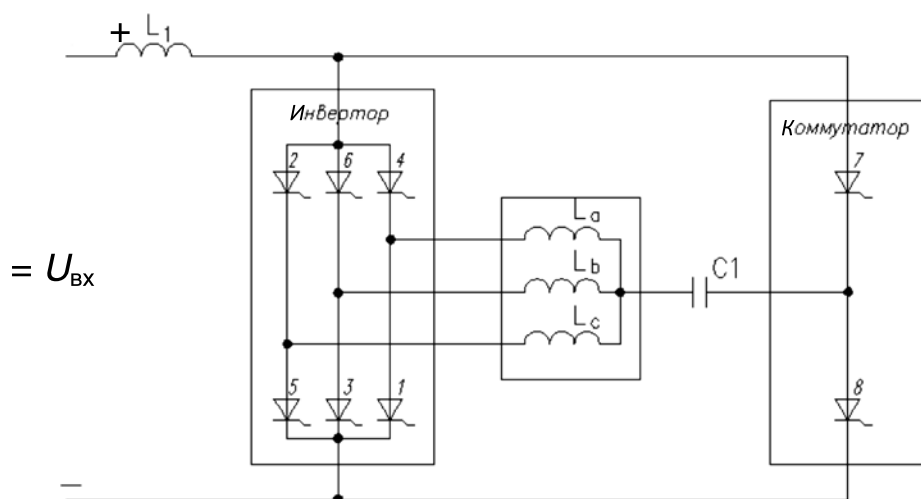


Рис. 1. Схема преобразователя частоты на основе АИТ со звеном искусственной коммутации на тиристорах и с одним конденсатором

ной коммутацией вентиля инвертора не позволяет получать предельные удельные характеристики двигателя, поскольку фаза расположения тока статорной обмотки по отношению к эдс возбуждения определяется параметрами машины и не является оптимальной. В связи с этим данные схемы в настоящей статье рассматриваться не будут.

Рассмотрим четыре вида схем преобразователя частоты на основе АИТ со звеном искусственной коммутации.

На рис. 1 представлена широко известная и простая схема инвертора тока со звеном искусственной коммутации.

Как видно из представленной схемы, она содержит помимо основного инверторного моста (1–6) два дополнительных коммутирующих тиристора (7, 8) и конденсатор (С1). По сигналу датчика положения ротора (ДПР) коммутирующие тиристоры обеспечивают подключение конденсатора к катодной или анодной группе инвертора, и конденсатор проводит гашение нужного

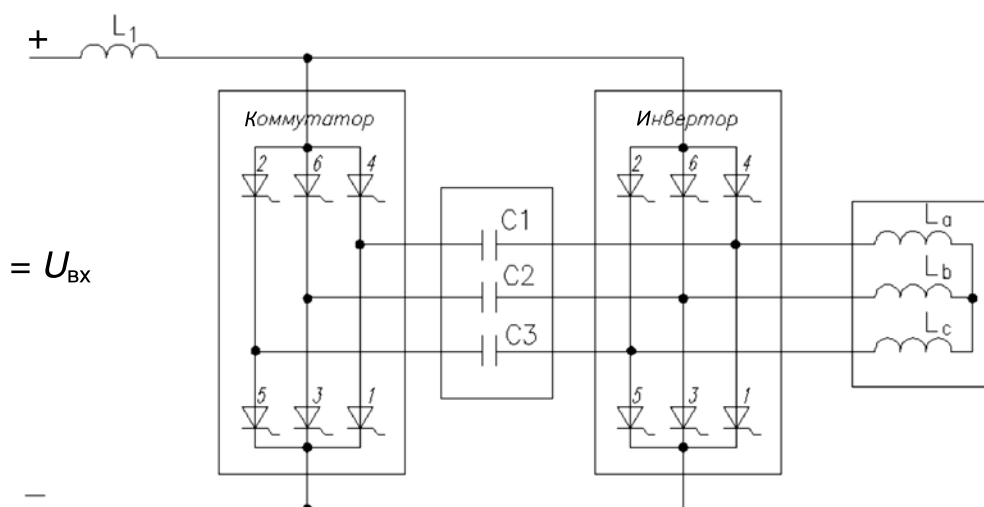


Рис. 2. Схема преобразователя частоты на основе АИТ с трехфазным тиристорным коммутатором и тремя конденсаторами

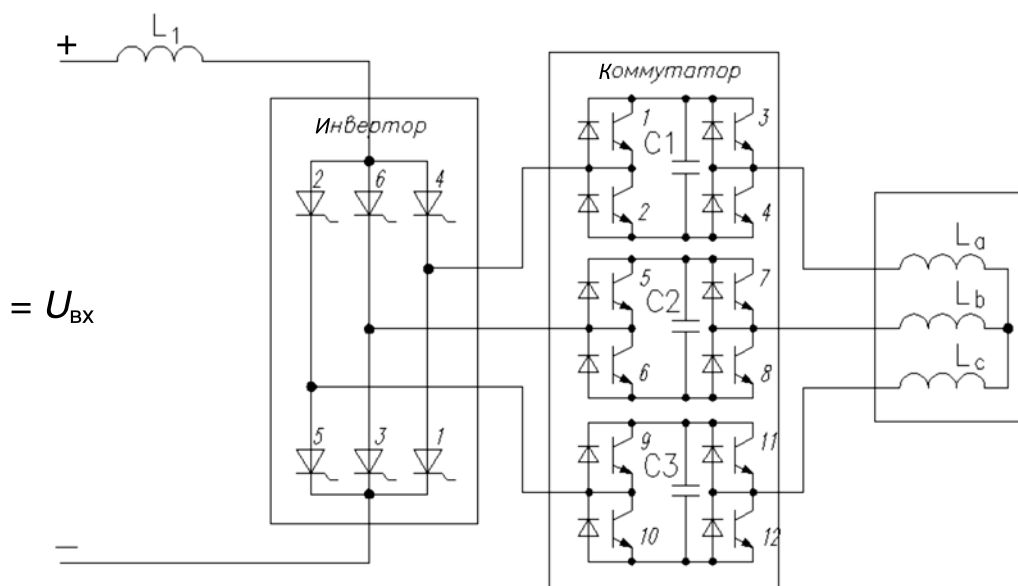


Рис. 3. Схема преобразователя частоты на основе АИТ с тремя однофазными звеньями искусственной коммутации на IGBT-транзисторах

тиристора в инверторе и соответствующего тока фазы. Затем после изменения полярности напряжения на конденсаторе обеспечивается включение следующего тиристора основного инверторного моста и заведение тока в следующую фазу.

Основным недостатком схемы является наличие значительных пульсаций электромагнитного момента двигателя из-за отключения тока в одной из фаз на время коммутации.

Постоянство тока двигателя в моменты коммутации и, соответственно, снижение пульсаций электромагнитного момента на валу машины может быть обеспечено при использовании схемы АИТ, показанной на рис. 2.

В этой схеме в состав преобразователя частоты помимо основного трехфазного тиристорного инвертора введен второй трехфазный мост на тиристорах (коммутатор) и три конденсатора — по одному на каждую фазу. Процесс коммутации можно разделить на три этапа. На первом этапе проводится отключение какого-либо тиристора основного инвертора, а ток фазы не обнуляется, как в предыдущей схеме, а переключается на один из тиристоров коммутатора. На втором этапе за счет на-

пряжения на конденсаторах снижается ток в отключаемой фазе и поднимается в подключаемой фазе. На завершающем этапе происходит гашение тиристоров коммутатора и включение соответствующих тиристоров основного инвертора.

Недостатками рассмотренной схемы являются переменное по знаку напряжение на конденсаторах, а также необходимость использования максимального напряжения на конденсаторах в 1,4 раза больше, чем это требуется при постоянном уровне напряжения.

Исключить изменение знака напряжения на конденсаторах позволяет схема АИТ, представленная на рис. 3. В рассматриваемой схеме коммутирующие конденсаторы включены в диагонали однофазных мостов, выполненных на основе транзисторов. Однофазные мосты расположены в каждой из фазных линий, связывающих основной инвертор с фазными обмотками машины [1].

Однофазный мост, плечи которого состоят из встречно-параллельно включенных IGBT-транзисторов и диодов, а в диагональ которого включен конденсатор, позволяет поддерживать постоянное по знаку напряжение на коммутирующем конденсаторе.

Величина пульсаций этого напряжения зависит от конкретных параметров схемы и может быть обеспечена на уровне 10–15 %.

Суммарный ток в машине в процессе коммутации так же, как и в схеме, приведенной на рис. 2, практически не изменяется, что обеспечивает низкий уровень пульсаций электромагнитного момента.

Существенным недостатком рассмотренной схемы является то, что однофазные мосты оказываются постоянно включенными в цепь питания статорных обмоток. Это приводит к значительному снижению КПД АИТ.

Исключить этот недостаток можно, используя схему АИТ, приведенную на рис. 4 [2].

Как видно из представленной схемы, она содержит два коммутирующих конденсатора, что позволяет изменять полярность коммутационного напряжения не за счет изменения полярности напряжения на конденсаторе, а за счет подключения то одного, то другого конденсатора. Напряжение на каждом из коммутирующих конденсаторов остается практически постоянным.

Схема АИТ содержит трехфазный мост на IGBT-транзисторах с обратными диодами, подключаемый при коммутации с помощью тиристоров 7 или 8 к основному мосту инвертора, выполненному на основе тиристоров.

Недостатком рассмотренной схемы является необходимость включения шести дополнительных коммутирующих тиристоров, которые соединяют соответствующие фазы основного и дополнительного трехфазных мостов. Эти тиристоры препятствуют самопроизвольному замыканию фазных токов по цепям диодов, шунтирующих транзисторы дополнительного трехфазного моста.

Осциллограммы, характеризующие поведение фазных токов и напряжений на конденсаторах в процессе коммутации, показаны на рис. 5.

Как видно из представленных на рис. 5 осциллограмм, процесс коммутации состоит из трех характерных участков. На интервале t_1-t_2 осуществляется выключение тиристора инвертора в отключаемой фазе и перевод тока в цепь коммутатора за счет энергии одного из его конденсаторов. На интервале t_2-t_3 осуществляется перевод тока из отключаемой фазы в подключаемую под действием напряжения последовательно включенных конденсаторов коммутатора, подключенных к линейным выводам фаз соответствующими тиристорами и IGBT-транзисторами коммутатора. На интервале t_3-t_4 производится дозаряд одного из коммутирующих конденсаторов, а по завершении этого процесса после подачи сигнала на соответствующий тиристор инвертора —

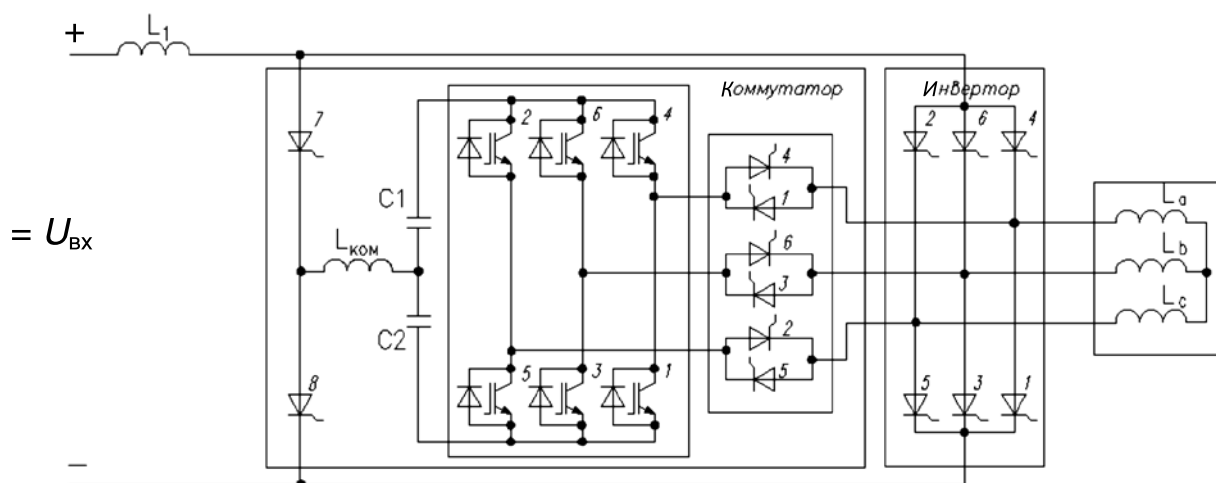


Рис. 4. Схема преобразователя частоты на основе АИТ с трехфазным звеном искусственной коммутации на IGBT-транзисторах

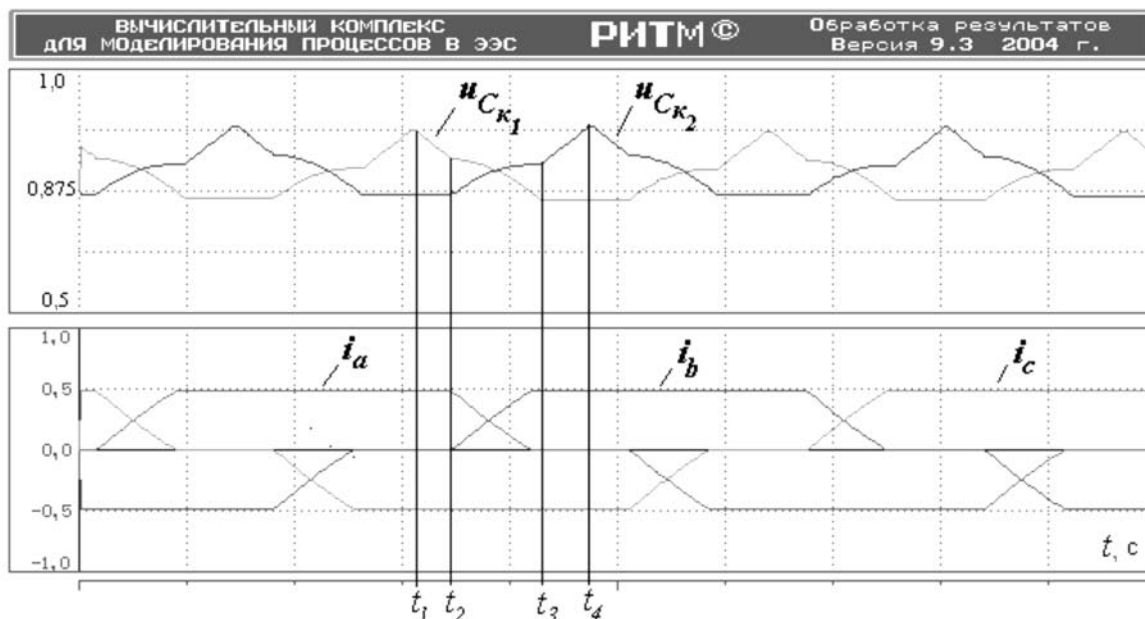


Рис. 5. Характерные кривые, описывающие поведение фазных токов и напряжений на конденсаторах в процессе коммутации

быстрый перевод тока из цепи коммутатора в цепь инвертора и отключение коммутирующих тиристоров и цепей коммутатора от цепей основного тока. На этом процесс коммутации завершается. Коммутация токов в других фазах осуществляется аналогично. При этом видно, что размах пульсаций напряжения на конденсаторах коммутатора составляет порядка 15 %. Суммарный ток в машине в процессе коммутации так же, как и в схемах, приведенных на рис. 2–4, практически не меняется, что обеспечивает низкий уровень пульсаций электромагнитного момента.

Сравнивая две последние схемы, отметим, что обе схемы обеспечивают практически идентичные характеристики фазных токов и напряжений. При этом вариант схемы на рис. 4 является более предпочтительным, поскольку имеет более высокий КПД за счет исключения из цепи основного тока IGBT-мостов. Следует также отметить, что представленная на рис. 3 схема содержит

меньшее количество IGBT-транзисторов и только две батареи коммутирующих конденсаторов, что снижает ее массу и габариты, несмотря на наличие шести дополнительных маломощных коммутирующих тиристоров.

В статье рассмотрены некоторые схемы АИТ со звеном искусственной коммутации, проанализированы их достоинства и недостатки. Наибольший интерес представляет схема, приведенная на рис. 4, которая имеет большее значение КПД при условии работы коммутирующего конденсатора без изменения полярности напряжения.

Схемы на основе АИТ, по сравнению со схемами на основе АИН, позволяют обеспечить уменьшить пульсации как в напряжении, так и в токе обмотки, что позволяет снизить потери в машине, улучшить виброакустические характеристики, а также упростить регулирование режимами работы машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мустафа, Г.М. Высоковольтный преобразователь частоты для асинхронного электропривода [Текст] / Г.М. Мустафа, Ю.М. Сеннов,

Ю.Ю. Скороход // Травек, VII симп. Электротехника 2010. – 2003. – Т. 4. – Ст. № 5.17. – С. 76–77.

2. **Булгаков, С.А.** Система питания и управления многофазной вентильной машиной: Евразийский патент № 015042 [Текст] / С.А. Булгаков, В.Г. Кучинский, В.М. Чайка; заяви-

тель и патентообладатель ОАО НПО «Русский электропривод». — Заявл. 07.04.2010. — Оpubл. 29.04.2011.

REFERENCES

1. **Mustafa G.M., Sennov Yu.M., Skorohod Yu.Yu.** Vyisokovoltnyiye preobrazovatel chastoty dlya asinhronnogo elektroprivoda / Travek, VII simp. Elektrotehnika 2010. — Т. 4. — Ст. № 5.17. — С. 76–77. (rus)

2. **Bulgakov S.A., Kuchinskiy V.G., Chayka V.M.** Sistema pitaniya i upravleniya mnogofaznoy ventilnoy mashinoy / Evraziyskiy patent № 015042; zayavitel i patentoobladatel ОАО NPO «Russkiy elektroprivod»; zayavl. 07.04.2010; opubl. 29.04.2011. (rus)

КУЧИНСКИЙ Владимир Георгиевич — профессор кафедры электротехники и электроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук. 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vladkuchinsky@mail.ru

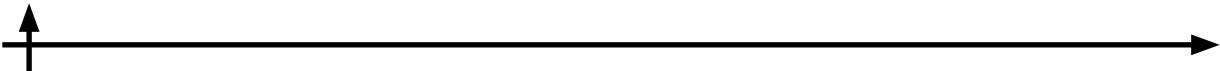
KUCHINSKY Vladimir G. St. Petersburg State Polytechnical University. 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

ПОПКОВ Евгений Николаевич — заведующий кафедрой электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, доцент. 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: ENPopkov@gmail.com

POPKOV Evgeny N. St. Petersburg State Polytechnical University. 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

ЧАЙКА Валерий Михайлович — начальник сектора систем питания отдела по разработке электроприводов, инженер ОАО НПО «Русский электропривод». 196247, Россия, Санкт-Петербург, Ленинский пр., д. 160, оф. 728.
E-mail: info@ruselprivod.ru

CHAYKA Valery M. Russian Electric Drive OJSC. 196247, Leninsky prospect 160, of. 728, St.-Petersburg, Russia.



Приборы, информационно-измерительные системы

УДК 615.47, 616-71, 616.12-073.97-71

Д.В. Толкович, М.Я. Марусина, Н.Б. Суворов, А.В. Козаченко

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

D.V. Tolkovich, M.Ya. Marusina, N.B. Suvorov, A.V. Kozachenko

MULTIFUNCTIONAL BIOTECHNICAL SYSTEM FOR THE STUDY PHYSIOLOGICAL SIGNALS OF INTELLECTUAL ACTIVITY

Рассмотрены структурная схема и функциональная организация информационно-измерительного комплекса для проведения физиологических исследований человека при напряженной интеллектуальной деятельности. На разработанном комплексе можно получить научные результаты, имеющие базовое значение для специалистов, занимающихся изучением психофизиологических механизмов интеллектуальной деятельности, а также для комплексной оценки функционального состояния человека в системах управления при различной физической и умственной нагрузке.

БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ. ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФ. БИОСИГНАЛЫ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС.

The article deals with the structural schema and organization of informational and measurement system for physiological studies of man during intense intellectual activity. Scientific results that may be obtained in evolve a complex, can have a base value for those engaged in the study of psychophysiological mechanisms of intellectual activities, as well as a comprehensive assessment of the functional state of the person in control systems with different physical and mental stress.

BIOTECHNICAL SYSTEM. INTELLECTUAL ACTIVITY. ELECTROENCEPHALOGRAPH. BIOLOGICAL SIGNALS. MEASURING COMPLEX.

Интеллектуальная деятельность является одной из наиболее сложно организованных психических функций и, в то же время, одной из специфических потребностей человека. Процесс интеллектуальной деятельности непосредственно связан с мгновенным или постепенным изменением значительного числа психофизиологических параметров, характеризующих состояние организма человека в данный момент времени. Соответственно, анализ и формулирование научно-практических выводов, многомерная оценка функционального состояния человека на основе комплекса психофизиологических показателей

является одним из наиболее трудоемких и ответственных процессов при диагностике, прогнозе текущего и последующего состояний испытуемых, и зависит, в частности, от состава многофункционального измерительного комплекса и объема его аналитических возможностей.

Современные системы функциональной диагностики направлены, как правило, на решение диагностических задач чисто медицинского характера и, в частности, выявления когнитивных нарушений, связанных с определенной патологией, и не предназначены для анализа творческой интеллектуальной деятельности.

Одним из ведущих методов в исследовании интеллектуальной деятельности является метод электроэнцефалографии. Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) отражает уровень функциональной активности и в этом смысле чрезвычайно чувствительна к влиянию внешних факторов, стрессу, утомлению, уровню внимания и бодрствования. ЭЭГ тесно связана с состоянием мозга человека в норме и при психосоматических, невротических, эмоциональных, поведенческих, когнитивных расстройствах [1, 2].

В настоящее время в медицинской диагностике в задачах комплексной оценки функционального состояния человека при исследовании интенсивной интеллектуальной деятельности широко применяются биотехнические системы (БТС) различного назначения.

Нами разработан универсальный диагностический измерительный комплекс (БТС) с одновременной многофункциональной регистрацией биоэлектрической активности испытуемых, способный использоваться как в обычной ЭЭГ диагностике электрической активности структур мозга, так и для исследования текущего и «рабочего» функционального состояния операторов информационных систем управления. Комплекс создан на основе сертифицированного электроэнцефалографа с современным про-

граммным обеспечением. В качестве прототипа была выбрана разработанная ранее биотехническая система «Шахматы» [3, 4]. В комплексе принята новая идеология синхронизации исследуемых физиологических параметров. Возможности электроэнцефалографа, применяемого для диагностики и обработки электрических сигналов от различных пространственных зон и структур мозга, дополнены и расширены блоком обработки нестационарных сигналов.

В состав разработанного комплекса включены следующие компоненты:

- электроэнцефалограф «Мицар ЭЭГ 202» [5];
- комплект церебральных ЭЭГ электродов MCSCap;
- датчик регистрации пульса испытуемого;
- датчики регистрации дыхания испытуемого;
- фотостимулятор «Мицар-ФОТО-2» на штативе;
- микрофон испытуемого на штативе;
- микрофон оператора;
- видеокамера для фиксации состояния испытуемого;
- спектроанализатор;
- персональный компьютер оператора;
- система громкоговорителей;
- кнопочный пульт испытуемого.

На рис. 1 приведена структурная схема

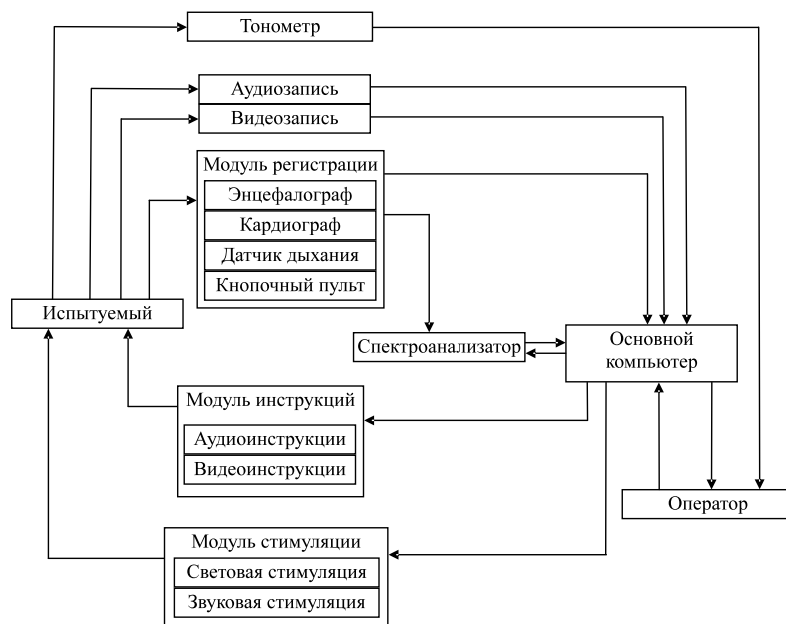


Рис. 1. Структурная схема многофункциональной биотехнической системы

разработанного комплекса.

Разработанный комплекс состоит из нескольких модулей: основные — компьютер оператора, модуль регистрации, модуль инструкций, аудиозапись и видеозапись, задействованные на любом этапе работы с комплексом; вспомогательные — модуль стимуляции, модуль спектроанализатора, модуль измерения давления.

Основной компьютер предназначен для регистрации сигналов, поступающих от испытуемого через модули регистрации, аудио- и видеозаписи. Также с помощью компьютера оператор задает режимы работы модуля инструкций и модуля стимуляции.

Модуль регистрации предназначен для обнаружения и усиления биоэлектрических сигналов испытуемого. Модуль представляет собой многоканальный регистратор, включающий регистрацию ЭЭГ, электрокардиосигнала (ЭКС) и функции дыхания (пневмограмма), а также кнопочный пульт испытуемого.

Модуль инструкций предназначен для предъявления заданий испытуемому в автоматическом и ручном режимах. Модуль включает аудиосистему и видеопроектор, управляемые компьютером оператора. Управляющие аудиосигналы синхронизируются по времени с биоэлектрическими сигналами от модуля регистрации. Модуль представляет собой чувствительный микрофон, соединенный с основным компьютером через согласующий усилитель. Модуль аудиозаписи предназначен для фиксации результатов интеллектуальной деятельности,

а также для создания аудиометок синхронизации с биомедицинскими сигналами.

Модуль видеозаписи предназначен для фиксации состояния испытуемого в процессе интеллектуальной деятельности. Модуль представляет собой видеокамеру, соединенную с основным компьютером. Видеопоток с камеры синхронизируется по времени с биомедицинскими сигналами от модуля регистрации.

Модуль стимуляции предназначен для подготовки испытуемого к проведению тестов, а также используется в процессе фиксации стандартных реакций на раздражители. Модуль представляет собой двухцветный светодиодный осветитель на штативе (световая стимуляция) и аудиосистему (звуковая стимуляция). Модуль управляется оператором через основной компьютер.

Спектроанализатор представляет собой специализированный компьютер, предназначенный для обработки биомедицинских сигналов, полученных от модуля регистрации, и для выделения спектров нестационарных сигналов.

Измерение артериального давления осуществляется с помощью электронного тонометра, показания которого фиксируются оператором.

На рис. 2 показаны некоторые компоненты комплекса.

Все испытуемые перед проведением исследований подписали информированное согласие.

На рис. 3 показан скриншот регистрации различных электрофизиологических сигнала-

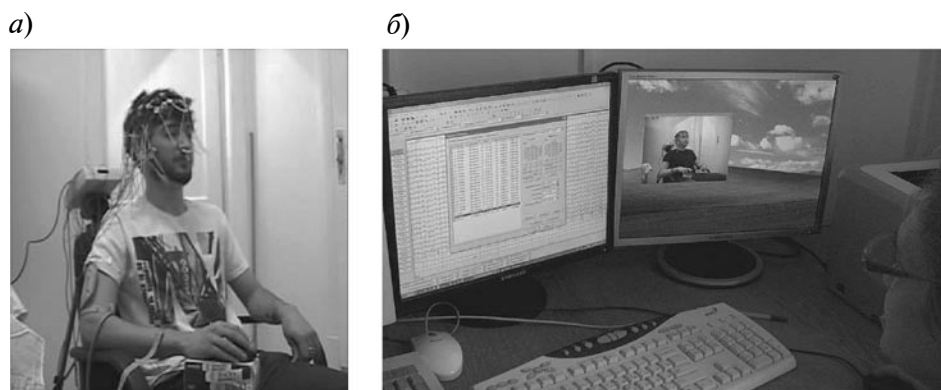


Рис. 2. Компоненты комплекса:

а — модуль регистрации физиологических сигналов, электроды на голове испытуемого, манжета тонометра на правой руке и кнопочный пульт в правой кисти; *б* — оператор контролирует процесс регистрации физиологических показателей на компьютере

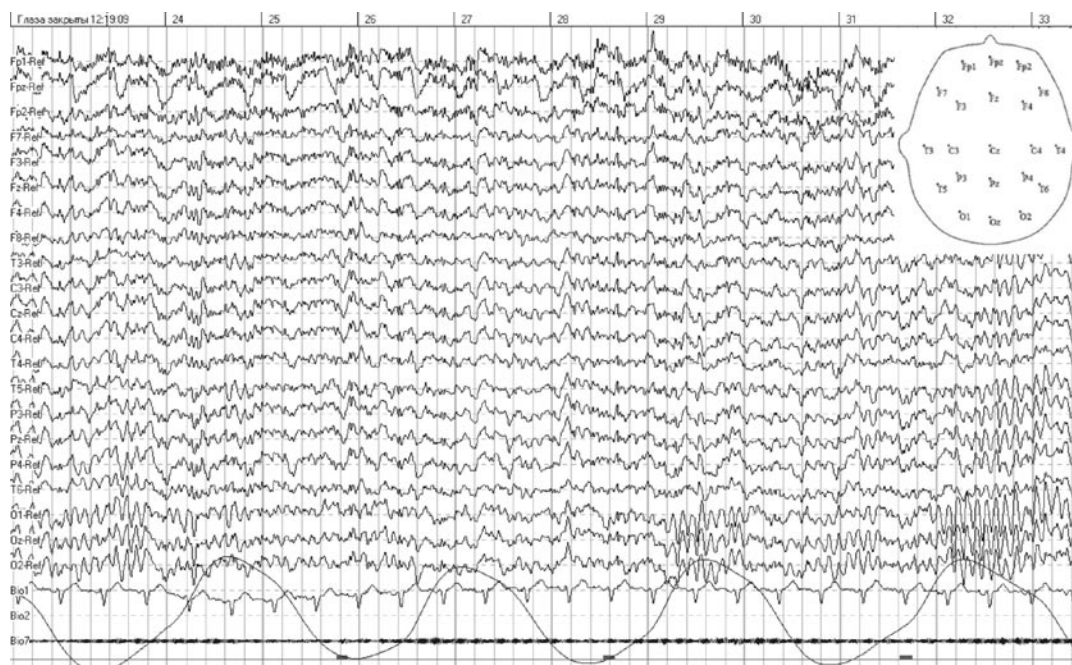


Рис. 3. Фрагмент регистрации физиологических сигналов (ЭЭГ, ЭКГ и пневмограмма)

лов: 21 отведение (канал) электроэнцефалограммы при выполнении математических действий (вычитание из тысячи) в уме с закрытыми глазами. Справа вверху наложена схема расположения электродов «10–20 %» по Джасперу. Электроды, маркированные индексом F, относятся к лобным отделам головного мозга, С – к центральным, Р – к теменным, Т – к височным, О – к затылочным. Bio1 – электрокардиограмма, регистрирует-

ся двумя электродами, зафиксированными на предплечьях испытуемого, Bio2 фиксирует функцию дыхания (пневмограмму) испытуемого, регистрируемую термодатчиком, Bio7 – аудиосигнал с микрофона испытуемого (в данном опыте не задействован). Прямая линия внизу – сигнал от кнопочно-го пульта, прямоугольники на ней – момент нажатия на кнопку. В верхней строке указаны режим и время исследования, отметки

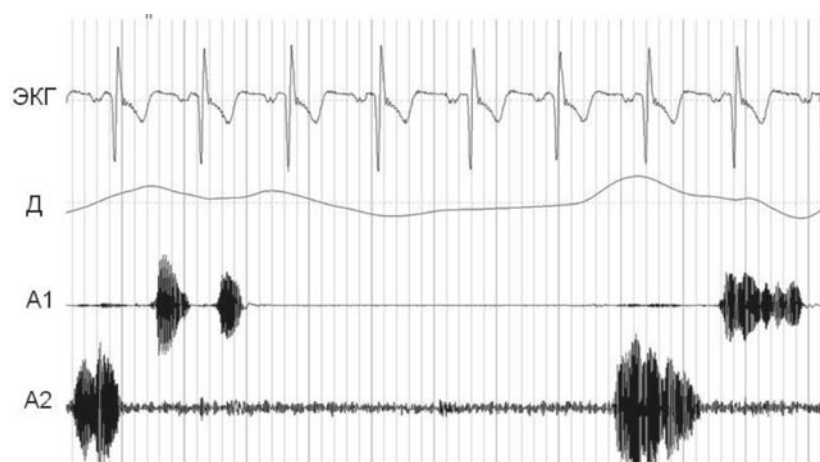


Рис. 4. Фрагмент регистрации физиологических и аудиосигналов: Д – дыхание; A1 – аудиосигнал испытуемого; A2 – аудиосигнал оператора

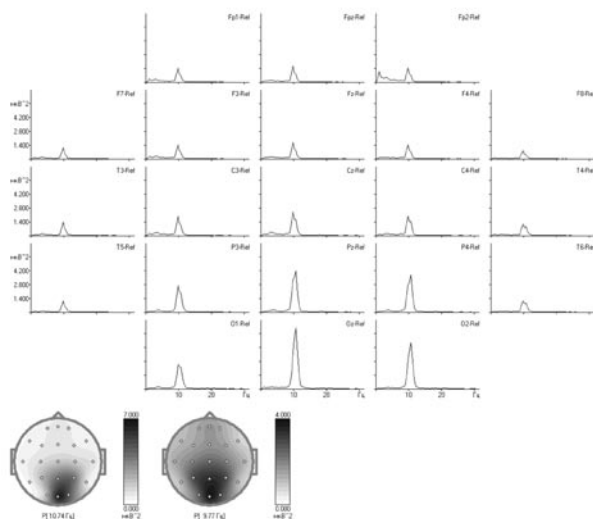


Рис. 5. Разложение фрагмента ЭЭГ на спектральные составляющие по отведениям. Состояние расслабленного бодрствования с закрытыми глазами

времени, между вертикальными линиями интервал составляет 0,2 с.

На рис. 4 показана синхронная регистрация электрофизиологических и информационных сигналов. В качестве физиологических сигналов использованы сигналы кардиограммы (ЭКГ) и дыхания (Д), а в качестве информационных — фрагмент общения между оператором (А2) и испытуемым (А1). Амплитуда сигналов регулируется независимо.

На рис. 5 приведен один из видов обработки зарегистрированных электрофизиологических сигналов — спектральный Фурье-анализ. Эпоха анализа равнялась 30 с, усреднялись спектры мощности четы-

рех секундных фрагментов с наложением 50 %. Внизу приведены топограммы распределения по поверхности головы двух доминирующих гармоник, лежащих в диапазоне альфа-ритма.

Разработан универсальный диагностический измерительный комплекс, который может использоваться как в обычной диагностике электрической активности структур мозга и сердечно-сосудистой системы, так и для исследования текущего и «рабочего» функционального состояния операторов информационных систем управления. Структурная схема комплекса отличается от известных наличием ряда свойств, позволяющих реализовать изучение электрофизиологических проявлений умственной деятельности человека в условиях как реальной, так и смоделированной когнитивной нагрузки. В комплексе благодаря синхронизации изучаемой умственной деятельности, срезов регистрируемых физиологических параметров испытуемого, технических и вспомогательных сигналов созданы возможности применения современных методов анализа нестационарных биологических процессов, сопровождающих переменную по напряженности интеллектуальную деятельность. Комплекс является открытой системой и может совершенствоваться в технических, информационно-аналитических и физиологических аспектах.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов, Н.Б. Электрофизиологические методы диагностики состояния центральной нервной и сердечно-сосудистой систем человека: Учеб. пособие [Текст] / Н.Б. Суворов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. — 84 с.
2. Иванов, Л.Б. Прикладная компьютерная электроэнцефалография [Текст] / Л.Б. Иванов. — М.: Изд-во Научно-медицинская фирма МБН, 2004. — перераб. — 352 с.
3. Суворов, Н.Б. Биотехническая система для изучения интеллектуальной деятельности человека [Текст] / Н.Б. Суворов, В.А. Абрамов, А.В. Козаченко, Ю.З. Полонский // Информационно-управляющие системы. — 2010. — № 5(48). — С. 70–77.
4. Анодина-Андреевская, Е.М. Перспективные подходы к анализу информативности физиологических сигналов и медицинских изображений человека, при интеллектуальной деятельности [Текст] / Е.М. Анодина-Андреевская, С.В. Божокин, М.Я. Марусина, Ю.З. Полонский, Н.Б. Суворов // Изв. вузов. Приборостроение. — 2011. — Т. 54. — № 7. — С. 27–34.
5. ООО «Мицар» [Электронный ресурс] / Режим доступа: www.mitsar-eeg.ru

REFERENCES

1. **Suvorov N.B.** Elektroфизиologicheskie metody diagnostiki sostoiianiia tsentral'noi nervnoi i serdechno-sosudistoi sistem cheloveka: Ucheb. posobie. —St.-Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2005. —84 s. (rus)
2. **Ivanov L.B.** Prikladnaia komp'iuternaia elektroentsefalografiia. —Moscow: Izd-vo Nauchno-meditsinskaia firma MBN, 2004; pererab. —352 s. (rus)
3. **Suvorov N.B., Abramov V.A., Kozachenko A.V., Polonskii Iu.Z.** Biotekhnicheskaiia sistema dlia izucheniiia intellektual'noi deiatel'nosti cheloveka / Informatsionno-upravliaiushchie sistemy. — 2010. — № 5(48). — S. 70–77. (rus)
4. **Anodina-Andrievskaia E.M., Bozhokin S.V., Marusina M.Ia., Polonskii Iu.Z., Suvorov N.B.** Perspektivnye podkhody k analizu informativnosti fiziologicheskikh signalov i meditsinskikh izobrazhenii cheloveka, pri intellektual'noi deiatel'nosti / Izv. vuzov. Priborostroenie. —2011. —T. 54. —№ 7. —S. 27–34. (rus)
5. ООО «Mitsar» [Available] www.mitsar-eeg.ru

ТОЛКОВИЧ Дмитрий Владиславович — аспирант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49.

E-mail: PYBY@inbox.ru

TOLKOVICH, Dmitriy V. *St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.*

197101, Kronverkskiy pr. 49, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: PYBY@inbox.ru

МАРУСИНА Мария Яковлевна — заведующий кафедрой измерительных технологий и компьютерной томографии Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49.

E-mail: marusina_m@mail.ru

MARUSINA, Maria Ya. *St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.*

197101, Kronverkskiy pr. 49, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: marusina_m@mail.ru

СУВОРОВ Николай Борисович — заведующий лабораторией нейрорекологии Научно-исследовательского института экспериментальной медицины Северо-Западного отделения РАМН.

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Акад. Павлова, д. 12.

E-mail: nbsuvorov@yandex.ru

SUVOROV, Nikolay B. *Institute of Experimental Medicine of the North West Branch of the Russian Academy of Medical Sciences.*

197376, Akad. Pavlov Str. 12, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: nbsuvorov@yandex.ru

КОЗАЧЕНКО Александр Викторович — доцент кафедры измерительных технологий и компьютерной томографии Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

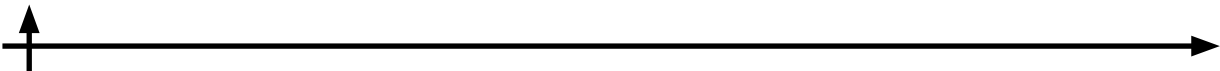
197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49.

E-mail: a_kozachenko@mail.ru

KOZACHENKO, Alexandr V. *St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.*

197101, Kronverkskiy pr. 49, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: a_kozachenko@mail.ru



Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

УДК 51-77

М.А. Коваженков, М.В. Коротеев, Е.Е. Сидорова

ПРИМЕНЕНИЕ КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ВЫСШЕГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ

M.A. Kovazhenkov, M.V. Koroteev, E.E. Sidorova

APPLICATION OF COGNITIVE MODEL FOR THE ESTIMATION OF INNOVATIVE POTENTIAL OF HIGH SCHOOL

В современных условиях вуз является основным поставщиком инноваций в производственную сферу, поэтому необходимо осуществлять мониторинг инновационной деятельности вуза с целью более эффективного использования его ресурсов. Рассмотрены вопросы применения когнитивных математических моделей для оценки инновационного потенциала вуза.

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ВУЗА. КОГНИТИВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ. СЕТИ БАЙЕСА. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЗА. ОЦЕНКА ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА.

In modern conditions, high school is a major provider of innovation in the manufacturing sector, so it is necessary to monitor the innovation of high school in order to make better use of its resources. The paper deals with the application of cognitive mathematical models to estimate the innovation potential of the university.

THE INNOVATIVE POTENTIAL OF HIGH SCHOOL. COGNITIVE MATHEMATICAL MODELS. BAYESIAN NETWORKS. THE EFFECTIVENESS OF THE HIGH SCHOOL. THE ESTIMATION OF INNOVATIVE POTENTIAL.

Современная рыночная экономика характеризуется преобладанием рынка знаний и информации над рынком материально-вещественных товаров и ресурсов. Система образования в целом и высшего профессионального образования в частности является одним из секторов национальной экономики, в котором формируется повышенный спрос на новые знания и технологии. Поэтому высшие учебные заведения сегодня имеют все возможности, чтобы стать центрами инновационной активности региональных экономик и Российской Федерации в целом.

Вуз сегодня — неотъемлемый элемент

национальной инновационной системы. Это обусловлено характером его продукции, поскольку он создает новшества во всех сферах своей деятельности. В сфере образования вуз готовит новых специалистов для деятельности в различных отраслях национальной экономики; в научном секторе разрабатывает и создает научную продукцию для ее использования в общественном производстве. Таким образом, вуз должен обладать значительным инновационным потенциалом, иначе он не сможет полноценно выполнять свои функции.

Развитие инновационной деятельности вузов направлено на создание условий для

развития экономики, основанной на знаниях. Эффективность экономики определяется степенью развития инновационных процессов, включающих как получение новых знаний, так и передачу их в производственный сектор экономики и в социальную сферу.

Учитывая все сказанное выше, очевидна актуальность оценки инновационного потенциала вуза и его подразделений с целью стимулирования развития инновационной активности и ориентации научных разработок на конечных потребителей.

В условиях возрастающего значения инновационной деятельности в экономическом развитии регионов требуется система показателей, которая позволяет оценивать не только количественные и качественные изменения, происходящие в инновационной сфере деятельности, но и осуществлять мониторинг ее влияния на экономику. Необходимо установление понятия инновационного потенциала вуза, его структуры, методики оценки, а также определение его влияния на инновационный потенциал региона.

Инновационный потенциал — это характеристика плотности потока нововведений, эффективности корпоративных НИОКР, скорости доведения новшеств до рынка, уровня технологического лидерства (или возможности следования за отраслевым или продуктовым лидером), обуславливающая синергию инновационной деятельности разных структурных подразделений [3].

Инновационный потенциал вузов, как считает ряд авторов, представляет собой системную совокупность взаимодействующих и взаимосвязанных инновационных ресурсов сектора высшей школы, необходимых в процессе осуществления инновационной деятельности с учетом их ограниченного характера и возможного (положительного или отрицательного) влияния на конечный результат деятельности, а также фактор реализации конкурентных преимуществ высшей школы, ее инвестиционно-инновационной привлекательности. К инновационным ресурсам могут относиться интеллектуальные, материальные, финансовые, информационные и иные ресурсы, которые могут быть

привлечены для организации инновационного процесса в высшей школе [2].

В экономической литературе понятие «инновационный потенциал» часто отождествляется с понятиями научного, интеллектуального, творческого и научно-технического потенциалов. Состояние инновационного потенциала вуза можно правильно оценить лишь в том случае, если инновационная деятельность рассматривается в неразрывном единстве с научно-технической и с образовательной деятельностью [5]. Наука, инновации и образование как подготовка квалифицированных кадров — это единая органическая система, без которой невозможно эффективное воплощение научных достижений вуза в экономику региона.

Инновационный потенциал вуза — это сложная категория, характеризующая способность системы к трансформации, развитию. С одной стороны, он является характеристикой существующих ресурсных возможностей, с другой, — отражает результативность процесса [4].

На сегодняшний день известны различные подходы к оценке инновационного потенциала:

1. Оценка инновационного потенциала по схеме ресурс — функция — проект. Сущность подхода заключается в оценке готовности организации к реализации одного нового проекта или оценке текущего состояния организации относительно всех или группы уже реализуемых проектов. В то же время не выделены критерии оценки инновационного потенциала, отсутствуют методы его расчета и не рассмотрены возможности практического использования данного подхода [1].

2. Оценка инновационного потенциала по показателям научно-исследовательской деятельности. Сущность подхода: инновационный потенциал рассмотрен как совокупность критериев, отражающих ресурсы организации, генерацию знаний и идей, управление и инфраструктуру. Особенность подхода заключается в экспертной оценке инновационного потенциала и его сравнении с инновационной активностью. В таком подходе проанализированы показатели

научно-исследовательской деятельности и не учтены результаты других сфер [1].

3. Оценка инновационного потенциала вуза как сложной системы, осуществляющей различные виды деятельности. Сущность подхода: инновационный потенциал рассмотрен как совокупность инновационных потенциалов трех сфер деятельности: образовательной, научно-технической и административно-управленческой. Предложена методика оценки инновационного потенциала по каждой сфере. Однако здесь нет единообразия в оценках, работа не апробирована на реальном примере [1].

Как видно из перечисленного выше, существуют различные подходы и методики к оценке инновационного потенциала высшей школы, но в основном они построены на результатах научно-исследовательской деятельности и не имеют единообразия в

оценках критериев. Все это говорит о необходимости разработки и принятия единой методики оценки инновационного потенциала вуза.

Инновационный потенциал вуза в общем случае можно рассматривать как сумму потенциалов его основных научно-инновационных подразделений (центров, институтов, кафедр, лабораторий и т. д.). Таким образом, возникает необходимость в разработке универсальной методики оценки инновационного потенциала научно-технической организации вуза с применением математических моделей.

Задача оценки инновационного потенциала вуза — слабоформализуемая задача, учитывающая большое количество различных по типу и содержанию факторов. Обобщающая оценка инновационного потенциала вуза является комплексной и

Система показателей, характеризующих деятельность вуза

Наименование показателя	Единицы измерения
1. Эффективность научной деятельности	
Объем финансирования проектов в научно-исследовательских, инновационных и внедренческих структурах, включая технопарки, бизнес-инкубаторы и т. п.	тыс. руб.
Численность студентов и аспирантов, привлекаемых на оплачиваемой основе к исследованиям в рамках деятельности инновационных структур	чел.
Общий объем научных исследований и разработок, гранты	тыс. руб.
Объем научных исследований и разработок, выполненных собственными силами	тыс. руб.
Патенты, полученные на разработки вуза	ед.
Внебюджетные средства, полученные вузом от физических лиц	тыс. руб.
2. Качество преподавания	
Контингент студентов, приведенный к очной форме обучения	чел.
Студенты очной формы обучения	чел.
Аспиранты	чел.
Докторанты	чел.
3. Квалификация профессорско-преподавательского состава (ППС)	
Лица, имеющие ученую степень доктора наук	чел.
Лица, имеющие ученую степень кандидата наук	чел.
Общее количество научно-педагогических кадров	чел.
Средняя заработная плата ППС/ средняя заработная плата в регионе	тыс. руб.
Публикационная активность ППС	ед.
4. Инфраструктура инновационной деятельности	
Балансовая стоимость машин и оборудования	тыс. руб.
Персональные компьютеры и компьютерные рабочие станции в вузе	ед.
Общее количество единиц хранения библиотечного фонда вуза	тыс. экз.

многоуровневой, она должна основываться на показателях, отражающих специфику вуза, его деятельности. В соответствии с данным подходом исходные показатели оценки инновационного потенциала объединены в группы исходя из традиционных функций вуза — научно-исследовательской, образовательной и инновационной. (см. табл.)

Считаем возможным для оценки инновационного потенциала вуза взять за основу систему обобщающих показателей, приведенных в Перечне показателей оценки эффективности деятельности федеральных государственных образовательных учреждений высшего профессионального образования и их филиалов [7] и в других нормативных документах Министерства образования и науки РФ [6–9].

В настоящее время оценки любых параметров деятельности вуза, не имеющих явного натурального численного выражения, производятся исключительно экспертным путем [5]. Это накладывает ограничения на масштаб применения данных методик и на их объективность.

Представляется актуальным создание когнитивных моделей оценки эффективности деятельности и инновационного потен-

циала вуза на основе комплексной математической методики анализа деятельности вуза как совокупности ряда взаимодействующих процессов.

В настоящее время развитие математических методов в экономике позволяет создать модель, обладающую как математической точностью, так и графической наглядностью и восприимчивостью к экспертным суждениям, касающимся не частных показателей, а общих, таких, как вид взаимосвязи между несколькими комплексными факторами, влияющими на деятельность образовательного учреждения. Применение когнитивных карт в виде графических вероятностных моделей (сетей Байеса) представляется наиболее предпочтительным выбором для данного вида моделирования [10].

На рис. 1 приведен фрагмент укрупненной сети Байеса, моделирующей в динамике деятельность образовательного учреждения. Как видно, модель обладает изрядной наглядностью, что значительно облегчает как разработку и модификацию модели, так и ее взаимодействие с экспертами, вносящими необходимую информацию, что значительно повышает эффективность использования такого класса моделей.



Рис. 1. Укрупненная когнитивная карта функционирования высшего образовательного учреждения (фрагмент)

На данной схеме стрелками обозначены причинно-следственные связи между факторами, которые математически могут выражаться одним из следующих способов:

1. Функциональная зависимость

$$A = f(b \in Par(a)). \quad (1)$$

2. Статистическая зависимость

а)



б)



в)



г)



Рис. 2. Схема свертки частных показателей в интегральные индикаторы

$$P(A = a) = P(A = a \mid \text{Par}(A)). \quad (2)$$

3. Нечеткая качественная зависимость — качественный уровень данного показателя зависит от уровней родителей по таблице правил вывода вида «ЕСЛИ ... ТО ...».

Ряд факторов в данной схеме предлагается рассматривать как индикаторы, соответствующие разделам показателей таблицы. Оценка уровней данных индикаторов производится методом аддитивной свертки по частным численным показателям. Схема свертки показателей показана на рис. 2.

В такой сети полная вероятность $P(C, T) = P(T|C) * P(C)$ выражается простейшим образом через произведение факторов $C * T$. Это верно и для более общего случая:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i \mid \text{Par}_G(X_i)), \quad (3)$$

где n — общее количество факторов; X_i — i -я переменная; $\text{Par}(X_i)$ — множество родителей i -й переменной согласно графу G . Безусловную вероятность переменной t можно получить, маргинализовав переменную c из фактора T : $P(T) = P(T|C) - c$. Также и в общем случае, $P(X_1, X_2, \dots, X_n \mid Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$.

Достоинством сетей Байеса является универсальность. Единоразово сконструированная сеть может использоваться для вычисления любых корректных запросов на области ее определения, т. е. не нужно изменять конструкцию сети, чтобы выполнять запросы определенного вида. Запрос является корректным, если выполняются два условия:

- все переменные, входящие в множества наблюдений и запросов, входят в область определения сети $Q \cup E \subseteq \text{score}(G)$;
- множества Q и E не пересекаются $Q \cap E = \emptyset$.

Итак, каждый запрос разбивает множество переменных области определения сети на три непересекающихся множества: Q , E и H . Значение любого запроса к Байесовской сети на этих множествах может быть

вычислен только из фактора, представляющего распределение полной вероятности $P(Q \cup E \cup H)$.

Необходимо создание комплексной модели функционирования образовательного учреждения, учитывающей весь спектр процессов, протекающих в нем, и основанной на всей совокупности информации, описывающей эти процессы. В таком случае анализ частных вопросов, таких, как оценка инновационного потенциала, может быть представлен как определенного вида запрос к данной комплексной модели.

Нам представляется, что применение такого подхода к моделированию деятельности вуза позволит достичь большей точности анализа, а также большей гибкости при очевидной универсальности. По нашему мнению, дополнительный объем работ, связанный с анализом большого количества данных оправдывается приведенными преимуществами.

Предложенный нами подход к оценке инновационного потенциала на основе когнитивных моделей позволяет учесть современные особенности функционирования различных сфер деятельности вуза. Положенный в основу реализации метод когнитивного моделирования, основанный на вероятностных графах (сетях Байеса) позволяет выставить итоговую оценку состоянию уровня инновационного потенциала вуза, определить слабые стороны, устойчивость достигнутого состояния, а также перспективные направления его повышения. Данный подход может базироваться не только на качественных оценках экспертов, но и на количественных показателях эффективности деятельности вуза. Рассмотренный подход в силу его универсальности применим для оценки эффективности деятельности любой образовательной организации: института, академии, университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов, С.Г. Интегрированная оценка инновационного потенциала вуза [Текст] / С.Г. Емельянов, Л.Н. Борисоглебская, Н.Е. Цуканова // Инновации. — 2006. — № 6. — С. 93–98.

2. Емельянов, С.Г. Экономический механизм стратегического управления развитием вуза: Монография [Текст] / С.Г. Емельянов. — М., 2007.

3. Инновационная экономика [Текст] / 2-е изд., испр. и доп. — М.: Наука, 2004.

4. **Коваженков, М.А.** Стратегические управленческие решения как фактор формирования инновационной стратегии вуза [Текст] / М.А. Коваженков. — Интеграл. — 2008. — №5. — С. 112–113.

5. **Краковецкая, И.В.** Оценка потенциала высших учебных заведений [Текст] / И.В. Краковецкая, Е.А. Монастырный, Н.О. Чистякова // Инновации. — 2010. — № 2. — С. 51–61.

6. Методика анализа качества подготовки выпускников учреждениями профессионального образования [Текст]. — Министерство образования и науки РФ, 2012.

7. Перечень показателей оценки эффективности деятельности федеральных государственных образовательных учреждений высшего профессионального образования и их филиалов [Текст]. — Министерство образования и науки РФ, 2012.

8. О проведении мониторинга деятельности федеральных государственных учреждений высшего профессионального образования [Текст]/ Приложение к приказу Министерства образования и науки РФ от 3 августа 2012 г. № 583.

9. Об утверждении объявления о проведении конкурсного отбора образовательных учреждений высшего профессионального образования, внедряющих инновационные образовательные программы [Текст]/ Распоряжение Министерства образования и науки РФ от 15 марта 2006 г. № Р-5.

10. **Сидорова, Е.Е.** Оценка качества преподавания и его влияние на эффективность деятельности образовательного учреждения на основе математических моделей [Текст] / М.В. Коротеев, Е.Е. Сидорова // Методика преподавания экономических дисциплин: матер. XIV Друкеровских чтений, 21–22 марта 2013. — МГУ им. М.В. Ломоносова, Ин-т проблем управления, Ин-т экономики РАН. — М., 2013. — С. 133–138.

REFERENCES

1. **Emel'ianov S.G., Borisoglebskaia L.N., Tsukanova N.E.** Integrirovannaya otsenka innovatsionnogo potentsiala vuza / Innovatsii. — 2006. — № 6. — С. 93–98. (rus)

2. **Emel'ianov S.G.** Ekonomicheskii mekhanizm strategicheskogo upravleniya razvitiem vuza: Monografiya. — Moscow, 2007. (rus)

3. Innovatsionnaya ekonomika; 2-e izd., ispr. i dop. — Moscow: Nauka, 2004. (rus)

4. **Kovazhenkov M.A.** Strategicheskie upravlencheskie resheniya kak faktor formirovaniya innovatsionnoi strategii vuza / Integral. — 2008. — № 5. — С. 112–113. (rus)

5. **Krakovetskaia I.V., Monastyrnyi E.A., Chistiakova N.O.** Otsenka potentsiala vysshihkh uchebnykh zavedeniy / Innovatsii. — 2010. — № 2. — С. 51–61. (rus)

6. Metodika analiza kachestva podgotovki vypusknikov uchrezhdeniyami professional'nogo obrazovaniya. — Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF. — 2012. (rus)

7. Perechen' pokazateley otsenki effektivnosti deyatel'nosti federal'nykh gosudarstvennykh obrazovatel'nykh uchrezhdeniy vysshego

professional'nogo obrazovaniya i ikh filialov. — Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF. — 2012. (rus)

8. O provedenii monitoringa deyatel'nosti federal'nykh gosudarstvennykh uchrezhdeniy vysshego professional'nogo obrazovaniya / Prilozheniye k prikazu Ministerstva obrazovaniya i nauki RF ot 3 avgusta 2012 g. № 583. (rus)

9. Ob utverzhdenii ob'yavleniya o provedenii konkursnogo otbora obrazovatel'nykh uchrezhdeniy vysshego professional'nogo obrazovaniya, vnedryayushchikh innovatsionnyye obrazovatel'nyye programmy / Rasporyazheniye Ministerstva obrazovaniya i nauki RF ot 15 marta 2006 g. № R-5. (rus)

10. **Koroteev M.V., Sidorova E.E.** Otsenka kachestva prepodavaniya i ego vliyanie na effektivnost deyatel'nosti obrazovatel'nogo uchrezhdeniya na osnove matematicheskikh modeley / Metodika prepodavaniya ekonomicheskikh distsiplin: mater. XIV Drukerovskikh chteniy, 21–22 marta 2013. — MGU im. M.V. Lomonosova, In-t problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, In-t ekonomiki RAN. — Moscow, 2013. — С. 133–138. (rus)

КОВАЖЕНКОВ Михаил Александрович — заместитель декана факультета экономики и управления, доцент кафедры менеджмента, маркетинга и организации производства Волгоградского государственного технического университета, кандидат философских наук.

400005, Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, д. 26.

E-mail: kovazhenkov@mail.ru

KOVAZHENKOV, Michail A. *Volgograd State Technical University.*
400005, Lenina Ave. 26, Volgograd, Russia.
E-mail: kovazhenkov@mail.ru

КОРОТЕЕВ Михаил Викторович — программист кафедры информационных систем в экономике, аспирант Волгоградского государственного технического университета.
400005, Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, д. 26.
E-mail: sejros@bk.ru

KOROTEEV, Michail V. *Volgograd State Technical University.*
400005, Lenina Ave. 26, Volgograd, Russia.
E-mail: sejros@bk.ru

СИДОРОВА Екатерина Евгеньевна — заместитель декана факультета экономики и управления, доцент кафедры экономики и финансов предприятий Волгоградского государственного технического университета, кандидат экономических наук.
400005, Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, д. 26.
E-mail: sikaterina@mail.ru

SIDOROVA, Ekaterina E. *Volgograd State Technical University.*
400005, Lenina Ave. 26, Volgograd, Russia.
E-mail: sikaterina@mail.ru

УДК 004.588

С.А. Нестеров, М.В. Сметанина

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ СРЕДСТВАМИ СРЕДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ MOODLE

S.A. Nesterov, M.V. Smetanina

QUALITY MEASUREMENT OF THE TEST TASKS IN THE LEARNING MANAGEMENT SYSTEM MOODLE

Рассмотрены статистические показатели качества тестовых заданий, рассчитываемые средой дистанционного обучения Moodle. Приведены примеры их использования при анализе результатов прохождения тестов студентами.

ТЕСТИРОВАНИЕ ЗНАНИЙ. ОЦЕНКА ТЕСТОВ. КОМПЬЮТЕРНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ. ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ. MOODLE.

The paper describes statistical measures of the test tasks quality, which learning management system Moodle calculates. Examples of practical use of these indicators are given.

KNOWLEDGE TESTING. QUALITY MEASUREMENT OF THE TEST TASKS. COMPUTER-BASED TESTING. E-LEARNING. MOODLE.

Использование компьютерных тестов позволяет существенно сократить временные затраты преподавателя на проведение контроля знаний студентов. В то же время возможность с помощью теста адекватно оценить уровень знаний обучающихся существенным образом зависит от качества используемых тестовых материалов. Популярная среда дистанционного обучения (СДО) Moodle позволяет оценить качество тестовых заданий на основе анализа статистических показателей.

СДО Moodle обладает широкими возможностями в части создания и использования учебных курсов, поддержки взаимодействия преподавателя со студентами, учета времени работы пользователей с материалами, оценки знаний обучающихся. Указанные возможности, свободное распространение продукта, локализация оболочки и ряд других факторов привели к широкой популярности этой системы в российских и зарубежных учебных заведениях.

Moodle может эффективно использоваться не только для дистанционного об-

разования, но и для поддержки проведения учебных курсов в очной и очно-заочной форме. В частности, подсистема тестирования, при проведении тестов в аудитории в присутствии преподавателя, может использоваться для промежуточного и итогового контроля знаний студентов. Аутентификация пользователей, возможность защиты теста паролем, задаваемые временные задержки между попытками сдачи теста одним и тем же обучающимся, настраиваемое ограничение на диапазон ip-адресов, с которых доступен тест, — все это позволяет существенно снизить вероятность фальсификации результатов тестирования недобросовестными студентами.

В то же время для проведения экзамена в форме теста преподавателю нужно быть уверенным, что результат прохождения теста корректно покажет уровень знаний студента. Если оставить в стороне психологические особенности (кому-то тест сдавать субъективно проще, чем экзамен в других формах, кому-то — сложнее), на результат тестирования, кроме непосредственно

знаний студента, могут повлиять как особенности теста в целом, так и особенности отдельных заданий. К первой группе можно отнести: время на прохождение теста и количество тестовых заданий, особенности используемой шкалы оценки, распределение заданий по разделам учебной дисциплины. Ко второй группе относятся: тип тестового задания (с выбором вариантов ответа, в открытой форме и т. д.), уровень сложности задания, корректность и доступность формулировки и ряд других характеристик. Данная статья посвящена вопросам оценки качества отдельных заданий.

Статистические показатели качества тестовых заданий

В теории педагогических измерений для оценки качества тестовых заданий широко используется анализ статистических показателей, полученных в результате пилотного прохождения теста группой студентов [1–3]. Некоторые из них используются СДО Moodle [2, 4, 5]. В частности, это *индекс легкости* (ИЛ, facility index), который показывает, какая часть студентов ответила правильно на анализируемый вопрос. Для i -го тестового задания он определяется по формуле

$$\text{ИЛ}_i = \frac{\bar{x}_i}{x_i(\max)}, \quad (1)$$

где $\bar{x}_i$ — среднее значение набранных студентами баллов за i -е задание; $x_i(\max)$ — максимально возможная оценка за i -е задание. Этот коэффициент в отчетах Moodle приводится в процентном представлении.

Если допустимые оценки за задание — только нуль (неправильно) и единица (правильно), то индекс легкости аналогичен коэффициенту решаемости [3], рассчитываемому как отношение количества студентов, ответивших правильно, к общему числу отвечавших на этот вопрос. В то же время могут встречаться тестовые задания, допускающие частично верный ответ. Например, это может быть задание на выбор N правильных вариантов из M возможных. В подобных случаях предпочтительнее использовать индекс легкости.

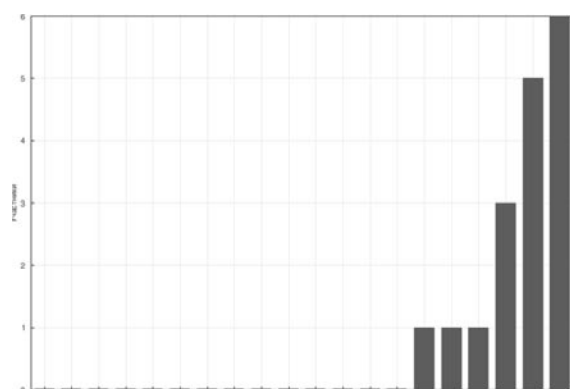
Хороший тест должен включать зада-

ния разного уровня сложности. При этом заданий с индексом легкости близким или равным как единице, так и нулю, лучше избегать. В первом случае задание является излишне простым — на него все ответили правильно, во втором случае — излишне сложным. В то же время, при анализе этого показателя надо учитывать уровень подготовки группы, проходившей тестирование.

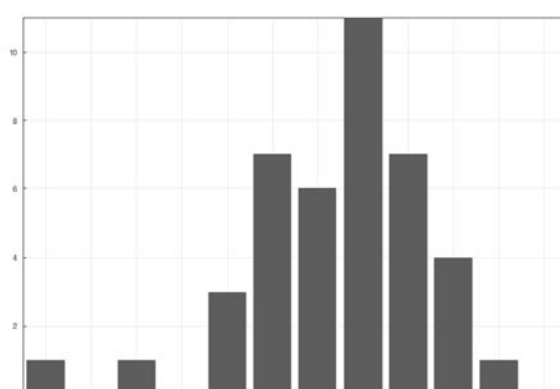
На рисунке представлены результаты прохождения одинаковых тестов группами с разным уровнем подготовки. Тестирование проводилось на кафедре системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ) по дисциплине «Администрирование в информационных системах». Рис. *а* соответствует более сильной группе студентов, рис. *б* — более слабой группе. На представленных гистограммах по горизонтальной оси откладываются диапазоны оценки в баллах, по вертикальной — количество студентов с оценкой в указанном диапазоне. Данная диаграмма формируется Moodle автоматически, исходя из числа студентов и разброса получаемых оценок, настроить шаг изменения оценки не предлагается, поэтому на гистограммах разное количество столбцов. Но общую картину они показывают: после приведения к пятибалльной шкале, в первой группе основная часть оценок была 5, во второй — 3 и 4. Из 87 тестовых заданий в использованном банке, индекс легкости, равный 100 %, в первом случае получился у 47 заданий, во втором случае — только у двух. Исключить из банка заданий больше половины, исходя только из результатов оценки первого теста, было бы неверно.

Следующий используемый показатель — *стандартное отклонение* (среднеквадратичное отклонение — СКО, standard deviation). Оно характеризует разброс значений оценок, полученных за данное задание теста. Если для какого-то задания этот показатель равен нулю, это означает, что все тестируемые получили за этот вопрос одинаковую оценку. Такой вопрос следует признать неудачным. В литературе отмечается [2], что в соответствии с требованиями педагогической теории измерений, задания со

а)



б)



Распределение оценок при прохождении теста:
а — «сильная» группа студентов; б — «слабая» группа

значением СКО менее 0,3 лучше исключать из теста, т. к. они не обладают достаточной дифференцирующей способностью, т. е. не способны разделить сильных и слабых учащихся.

СДО Moodle также рассчитывает *индекс дифференциации* (ИД, discrimination index) — показатель, приблизительно характеризующий способность тестового вопроса отличить сильных студентов от слабых. Для его расчета обучающиеся по результатам прохождения всего теста делятся на три подгруппы, включающие по 1/3 от общего количества [4]: сильные, слабые и все остальные. Для i -го тестового задания индекс определяется по формуле:

$$\text{ИД}(i) = \frac{X_{\text{сильн}}(i) - X_{\text{слаб}}(i)}{N}, \quad (2)$$

где $X_{\text{сильн}}(i)$ — сумма отношений набранных баллов к максимальному за это задание, полученных при ответе на i -е задание 1/3 испытуемых, которые получили самые высокие баллы за тест в целом; $X_{\text{слаб}}(i)$ — сумма отношений набранных баллов к максимальному, полученных при ответе на i -е задание 1/3 испытуемых, которые получили самые низкие баллы за тест в целом; N — число учащихся в подгруппе (оно делается равным в сильной и слабой подгруппах, даже если общее число испытуемых не кратно трем).

Индекс дифференциации может принимать значения в диапазоне от единицы до

минус единицы. Если этот показатель равен единице, то на данный вопрос все сильные студенты дали правильный ответ, а все слабые — неправильный. Если задание имеет отрицательный индекс дифференциации, то на него слабые учащиеся отвечают лучше, чем сильные. Такие задания уменьшают точность тестирования, рекомендуется их исключать.

Коэффициент дифференциации (КД, discrimination coefficient) также призван оценить способность тестового задания разделить сильных и слабых учащихся. Это коэффициент корреляции между множеством значений ответов, полученных испытуемыми при выполнении конкретного задания, с результатами выполнения ими теста в целом [4, 5]:

$$\text{КД}(i) = \frac{\sum (x \cdot y)}{(N \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y)}, \quad (3)$$

где x — отклонения от среднего значения множества баллов, полученных испытуемыми при ответе на конкретное задание; y — отклонения от среднего значения множества баллов, полученных испытуемыми за тест в целом; N — общее количество ответов на данный вопрос; σ_x — среднее квадратичное отклонение множества баллов, полученных испытуемыми при ответе на данное задание; σ_y — среднее квадратичное отклонение множества баллов, полученных испытуемыми за тест в целом.

Этот показатель, как и предыдущий,

характеризует дифференцирующую способность тестовых заданий и может принимать значения в диапазоне от единицы до минус единицы. Положительное значение коэффициента показывает, что на данное задание лучше ответили сильные студенты, а отрицательное значение показывает, что лучше ответили слабые студенты. Считается, если значение КД больше или равно 0,3, то тестовое задание имеет достаточную дифференцирующую способность [2, 5]. Задания с отрицательным значением коэффициента следует исключать из банка вопросов. В отличие от ИД, при расчете КД используется информация о результатах всех тестируемых, поэтому данный параметр считается более точным показателем дифференцирующей способности задания.

Параметры оценки, предлагаемые в СДО Moodle 2.3

В СПбГПУ используется несколько версий СДО Moodle: в одной инсталляции осталась версия 1.9, в другой — используется версия 2.3. В части инструментов анализа тестовых заданий, Moodle v.2.3 отличается от версии 1.9 не только расположением страницы с рассматриваемыми данными (в v.2.3 к ним ведет цепочка ссылок <Название теста> → Результаты → Статистика), но и набором рассчитываемых параметров. Наряду с индексом легкости и стандартным отклонением рассчитывается ряд новых показателей [1, 6]. В связи с тем, что не все названия показателей переведены на русский язык при локализации, а у документации пока нет официального перевода, для обозначения ниже будут использоваться английские аббревиатуры.

Случайно угаданная оценка (random guess score) — оценка, которую мог бы получить студент при случайном угадывании ответов. Например, если требуется выбрать один вариант ответа из четырех возможных, это значение будет равно 25 %.

Намеченный вес (intended question weight — IQW) — вес, который назначается тестовому заданию при формировании сценария теста. Если за одно задание назначено три балла из десяти возможных за тест в

целом, то намеченный вес составляет 30 %. Если обозначить через $x_p(\max)$ и $x_p(\min)$ максимально и минимально возможные оценки за задание, а $T_{\max}$ и $T_{\min}$ — максимальную и минимальную возможные оценки за тест (в текущей версии $x_p(\min)$ и, соответственно, $T_{\min}$ всегда равны нулю), получим формулу расчета этого показателя:

$$IQW_p = 100 \% \cdot \frac{x_p(\max) - x_p(\min)}{T_{\max} - T_{\min}}. \quad (4)$$

Здесь надо пояснить, что этот параметр рассчитывается не для конкретного вопроса, а для «позиции» задания в тесте. Например, тест может формироваться так, что на каждую позицию случайно выбирается один из нескольких альтернативных вопросов на заданную тему. И если индекс легкости может рассчитываться и для отдельного вопроса, и для «позиции» в тесте, то намеченный и эффективный вес — это характеристики только «позиции» в тесте.

В данной статье, так же как в документации Moodle v.2.0 и выше [6], для обозначения номера вопроса будет использоваться индекс i (все множество вопросов — I), для обозначения позиций в тесте — индекс p и множество P , для обозначения попытки сдачи теста — s и S , соответственно. Количество набранных студентом баллов за тест будет обозначаться T_s , оценка студента за конкретное задание теста — $x_p(s)$, оценка студента за все остальные задания — $X_p(s)$:

$$T_s = \sum_{p \in P} x_p(s), \quad (5)$$

$$X_p(s) = T_s - x_p(s).$$

Дисперсия показателя будет обозначаться $V()$, например:

$$V(x_p) = \frac{1}{S-1} \sum_{s \in S} (x_p(s) - \bar{x}_p)^2. \quad (6)$$

Ковариация будет обозначаться через $C()$, например:

$$C(x_p, X_p) = \frac{1}{S-1} \sum_{s \in S} (x_p(s) - \bar{x}_p)(X_p(s) - \bar{X}_p). \quad (7)$$

Вернемся к рассмотрению рассчитываемых Moodle показателей.

Эффективный вес (effective question weight — EQW) характеризует фактическую

долю конкретного задания («позиции» в тесте) в итоговой оценке студентов за тест:

$$EQW_p = 100 \% \cdot \frac{\sqrt{C(x_p, T)}}{\sum_{p \in P} \sqrt{C(x_p, T)}}. \quad (8)$$

В идеале эффективный вес должен быть равен назначенному. Имея эти значения, преподаватель может скорректировать назначенные веса заданий теста.

Индекс дискриминации (использовано название из локализации Moodle v.2.3, discrimination index) в версии Moodle 2.3 рассчитывается как коэффициент дифференциации в предыдущей версии и обозначается в документации D_p [6]:

$$D_p = 100 \% \cdot \frac{C(x_p, X_p)}{\sqrt{V(x_p)V(X_p)}}. \quad (9)$$

Хотелось бы еще раз отметить, что этот коэффициент показывает, насколько взаимосвязаны правильность ответа на данный вопрос и остальные вопросы теста. Для хорошего тестового вопроса предполагается, что студенты с высокими оценками за него также будут иметь более высокие оценки и за тест в целом. На это укажет положительное значение коэффициента. При этом отмечается [6], что если индекс легкости вопроса отличен от 50 %, D_p не может быть 100 %. Если индекс легкости близок к нулю или 100 %, то индекс дискриминации всегда будет очень маленьким, а при равенстве индекса легкости нулю или 100 % D_p будет не определен.

Эффективность дифференциации (discriminative efficiency) — еще один показатель, который по назначению во многом аналогичен индексу дискриминации, но лишен указанного выше недостатка. Он рассчитывается по формуле

$$DE_p = 100 \% \cdot \frac{C(x_p, X_p)}{C_{\max}(x_p, X_p)}, \quad (10)$$

где $C(x_p, X_p)$ рассчитывается по формуле (7), а для расчета $C_{\max}(x_p, X_p)$, множества значений $x_p(s)$ и $X_p(s)$ предварительно сортируются по возрастанию, как будто первый

студент получил самые низкие баллы x_p и X_p , а последний студент — самые высокие x_p и X_p .

Индекс дискриминации и эффективность дифференциации рассчитываются как для позиции в тесте, так и для отдельного вопроса.

Оценка теста встроенными средствами СДО Moodle

На кафедре системного анализа и управления в летнюю сессию 2012–2013 учебного года проводилось тестирование нескольких групп студентов по дисциплине «Администрирование в информационных системах» с использованием СДО Moodle. Анализ статистики прохождения теста «сильной» и «слабой» группами показал, что один вопрос по результатам оценки теста и в той, и в другой группе получил индекс легкости, равный 100 %. Он будет перемещен из банка заданий экзаменационного теста в пробный тест.

Также было обнаружено два задания с отрицательными значениями индекса дискриминации. Эти задания также не будут в дальнейшем использоваться в экзаменационном тесте.

Учитывая, что результаты тестирования «сильной» группы студентов совпали с ожидаемыми преподавателем, полученный большим количеством тестовых заданий стопроцентный индекс легкости при анализе теста решено не учитывать. В остальном, рассчитываемые СДО Moodle статистические показатели указывают на приемлемое качество большинства тестовых заданий.

В заключение хотелось бы еще раз отметить, что одним из достоинств подсистемы тестирования СДО Moodle является предоставление развернутого отчета по результатам прохождения тестов. Анализ статистических параметров, автоматически рассчитываемых системой для тестовых заданий, позволяет преподавателю выявить неудачные задания и откорректировать или заменить их в тесте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коржик, И.А. Тестовая система Moodle и качество тестовых заданий [Текст] / И.А. Коржик, И.В. Протасова, А.П. Толстобров // Современные информационные технологии и ИТ-образование: Сб. избранных трудов VII Междунар. науч.-практич. конф. — М.: ИНТУИТ.РУ, 2012. — С. 187–196.
2. Толстобров, А.П. Возможности анализа и повышения качества тестовых заданий при использовании сетевой системы управления обучением MOODLE [Текст] / А.П. Толстобров, И.А. Коржик // Вестник Воронежского гос. ун-та. Системный анализ и информационные технологии. — 2008. — № 2. — С. 100–106.
3. Иванов, Б.С. Основы педагогической диагностики и мониторинг образовательной деятельности в техническом вузе [Текст] / Б.С. Иванов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 120 с.
4. Quiz reports [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://docs.moodle.org/19/en/Quiz_reports#Item_analysis
5. Коржик, И.А. Оценка качества тестов в системе электронного обучения MOODLE [Электронный ресурс] / И.А. Коржик, А.П. Толстобров. — Режим доступа: <http://www.infoco.ru/mod/data/view.php?d=4&rid=114>
6. Quiz statistics calculations [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://docs.moodle.org/dev/Quiz_statistics_calculations

REFERENCES

1. Korzhik I.A., Protasova I.V., Tolstobrov A.P. Testovaya sistema Moodle i kachestvo testovykh zadaniy / Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie: Sb. izbrannykh trudov VII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. — Moscow: INTUIT.RU, 2012. — С. 187–196. (rus)
2. Tolstobrov A.P., Korzhik I.A. Vozmozhnosti analiza i povysheniia kachestva testovykh zadaniy pri ispol'zovanii setevoi sistemy upravleniia obucheniem MOODLE / Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii. — 2008. — № 2. — S. 100–106. (rus)
3. Ivanov B.S. Osnovy pedagogicheskoi diagnostiki i monitoring obrazovatel'noi deiatel'nosti v tekhnicheskome vuze. — St.-Petersburg: Izd-vo SPbGPU, 2003. — 120 s. (rus)
4. Quiz reports. [Available] http://docs.moodle.org/19/en/Quiz_reports#Item_analysis
5. Korzhik I.A., Tolstobrov A.P. Otsenka kachestva testov v sisteme elektronnoho obuchenii MOODLE [Available] <http://www.infoco.ru/mod/data/view.php?d=4&rid=114>
6. Quiz statistics calculations. [Available]: http://docs.moodle.org/dev/Quiz_statistics_calculations

НЕСТЕРОВ Сергей Александрович — доцент кафедры системного анализа и управления Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: nesterov@saiu.ftk.spbstu.ru

NESTEROV, Sergei A. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: nesterov@saiu.ftk.spbstu.ru

СМЕТАНИНА Мария Викторовна — инспектор по кадрам сектора по ДПО Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: manka.3663@yandex.ru

SMETANINA, Maria V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: manka.3663@yandex.ru



Экстремальная робототехника

В данный раздел вошли статьи, представленные на ежегодной конференции по экстремальной робототехнике, прошедшей в этом году в формате международного симпозиума.

История конференции, ее превращение в ежегодное мероприятие объективно связаны с историей отечественной робототехники. После аварии на Чернобыльской АЭС и ликвидации ее последствий возникла новая актуальная проблематика в робототехнике, которая получила название *экстремальной робототехники*.

Сегодня, когда экстремальная робототехника стала авангардом научно-технического развития робототехники в целом, значение нашей конференции соответственно возросло.

Ее тематика охватывает широкий круг вопросов, связанных с созданием робототехнических систем нового поколения, с освоением все более сложных операций в экстремальных и чрезвычайных ситуациях, в том числе при борьбе с терроризмом, решении оборонных задач, пожаротушении, освоении космоса и глубин Мирового океана, проблем атомной энергетики и опасных производств, медицины.

Предлагаемые вашему вниманию статьи представляют интерес для специалистов в области создания робототехнических комплексов наземного базирования и специальных мобильных роботов.

*Председатель национального программного комитета
международного симпозиума 7th IARP RISE-ER'2013,
доктор технических наук, профессор Е.И. Юревич*

This section includes papers presented at the annual conference on extreme robotics, which was held this year in the format of an international workshop.

The history of our conference and its transformation into annual event is reasonably connected with the history of robotics in Russia. After Chernobyl catastrophe and its consequences mitigation the new challenging problem in robotics has arisen – the extreme robotics.

Nowadays, when the extreme robotics has become the forefront for scientific and technical development of robotics in the whole, the significance of our conference has grown as well.

The subject matter of the international event to be held spreads over a wide range of problems, connected with creation of robotic systems of new generation, including the necessity of more and more complicated operations in extreme and risky environments and situations – threat of terrorism, defense, firefighting, exploration of space and the depths of oceans, problems of nuclear energy and hazardous production facilities, medicine among them.

The papers offered to your attention appeal to specialists in the field of construction of ground-based robotic systems and special mobile robots.

*Chairman of the National Program Committee
of the 7th International Workshop IARP RISE-ER'2013,
doctor, professor E.I. Yurevich*

УДК 62-503.57

В.Н. Герасимов

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В СРЕДЕ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

V.N. Gerasimov

THE MOTION CONTROL SYSTEM OF THE MOBILE ROBOT IN ENVIRONMENT WITH DYNAMIC OBSTACLES

Исследованы два метода управления движением мобильного робота в составе навигационной системы: метод эффективного пути и метод динамического окна. Проведено моделирование и получены зависимости результатов работы методов от различных параметров. Предложен алгоритм определения параметров движения динамических препятствий по данным лазерного дальномера.

МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ. ПОДВИЖНЫЕ ПРЕПЯТСТВИЯ. УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ. ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР.

In the paper two methods of mobile robot motion control are investigated in composition of navigation system: effective path method and dynamic window method. A simulation was performed and dependencies of methods results from various parameters are obtained. The algorithm to determine the parameters of motion from laser rangefinder is offered.

MOBILE ROBOT. MOVING OBSTACLES. ROBOT CONTROL. LASER RANGEFINDER.

Задача автоматического управления мобильным роботом в среде, содержащей подвижные препятствия, в настоящее время является актуальной. В статье рассматриваются и анализируются методы ее решения. Задача ставится следующим образом. Мобильный робот, оснащенный сканирующим лазерным дальномером, находится в помещении. Известна карта данного помещения, построенная при помощи алгоритма SLAM. Приводной уровень системы управления робота выполняет задание вектора скорости $(v, \omega)^T$. Необходимо, управляя вектором скорости, провести робот до заданной целевой точки, избегая столкновения с препятствиями (неподвижными и подвижными).

Существует много способов решения данной задачи, поэтому целью исследования является выбор наиболее эффективных методов: универсальных, надежных, простых в реализации; затем — проведение моделирования и, наконец, их сравнение по результатам моделирования.

Решение поставленной задачи обычно разделяют на два этапа: поиск оптимального маршрута по карте и следование вдоль полученного маршрута. Существует множество алгоритмов поиска оптимального маршрута, в нашем исследовании будет применяться наиболее широко распространенный — A^* (А-звезда). Этот алгоритм достаточно хорошо изучен, поэтому в данной статье не будем его подробно рассматривать.

Задача следования вдоль маршрута имеет несколько подходов к решению, взятых из теории автоматического управления. Существуют различные системы управления, построенные на разных принципах:

- 1) СУ с линейными регуляторами;
- 2) оптимальное управление;
- 3) нечетко-логический контроллер;
- 4) нейросетевой контроллер.

Рассмотрим подробнее два первых варианта. В первом случае задача сводится к расчету опорной точки — положению на плоскости, к которому должен стремиться



ся робот, а также реализации внешнего контура управления приводного уровня робота, отрабатывающего заданное положение на плоскости. Одним из наиболее успешных методов вычисления опорной точки является метод эффективного пути [1]. Суть метода заключается в следующем. В качестве номинальной опорной точки принимается второй излом кусочно-линейной траектории. Это предположение основано на факте, что обнаружение первого изменения направления траектории, которое дало бы опорную точку с дискретным шагом в 45° относительно положения робота, недостаточно для того, чтобы определить тенденцию дальнейшего изменения траектории. Кроме того, вводятся ограничения на длину вектора эффективного пути: сверху с учетом максимально возможного времени беспрепятственного движения и снизу, учитывая минимальный тормозной путь. Таким образом, длина эффективного пути адаптивно увеличивается при повышении скорости робота, и наоборот.

Перейдем к системе управления с линейными регуляторами. Ее особенность заключается в том, что она содержит два параллельных контура слежения: курс на опорную точку и расстояние до нее, причем управление в контуре расстояния зависит от сигнала рассогласования в контуре курса. Такой подход объясняется тем, что движение к цели имеет смысл только тогда, когда курс робота близок к курсу на опорную точку. При этом, чем меньше ошибка, тем выше скорость перемещения.

Предложенный выше вариант управления мобильным роботом позволяет двигаться в среде с подвижными препятствиями, рассматривая их как статические в каждый отдельный момент времени. Однако оригинальный метод эффективного пути не предполагает учет подвижных препятствий и, следовательно, не гарантирует эффективное маневрирование в динамической среде без столкновений. Поэтому он был модифицирован так, чтобы изменять положение опорной точки в зависимости от наличия препятствий и параметров их движения [2]. Очевидно, что для определения опорной точки в динамической среде

необходимо экстраполировать траекторию движения как препятствий, так и робота. В обозначенной статье данный алгоритм описан подробно, здесь же укажем только ключевой момент: если при экстраполяции траектории пересекаются, то необходимо еще раз выполнить планирование маршрута на карте с новыми препятствиями, расположенными в точках пересечения траекторий, а также сдвинуть опорную точку в зону, свободную от столкновений.

Теперь, имея представление о реализации метода эффективного пути, можно провести моделирование. В ходе моделирования проверялись следующие характеристики методов эффективного пути (оригинального и модифицированного для учета динамических препятствий):

L_{path} — длина пройденного роботом пути;

T_{path} — время от начала движения до достижения роботом целевой точки;

D_{max} — максимальное отклонение траектории робота от спланированного маршрута;

траектория робота (для визуальной оценки).

При этом были получены зависимости этих характеристик от параметров методов (максимально допустимые скорости и ускорения, коэффициенты регуляторов в контуре управления и т. п.) и количества препятствий.

Для сравнения метода с учетом подвижных препятствий и без него проведено моделирование с различным числом препятствий от нуля до десяти. На рис. 1 а, б представлены зависимости интересующих нас характеристик от числа препятствий и траектории движения робота для каждого случая без учета подвижных препятствий. Как можно заметить, при увеличении числа препятствий растет время достижения цели, длина пройденного пути. Результаты работы алгоритма, использующего метод эффективного пути с учетом подвижных препятствий, рассмотрим на рис. 1 в, г. Визуально оценивая полученные траектории, уже можно сделать вывод об эффективности данного метода в отличие от предыдущего, однако, примем к сведению объек-

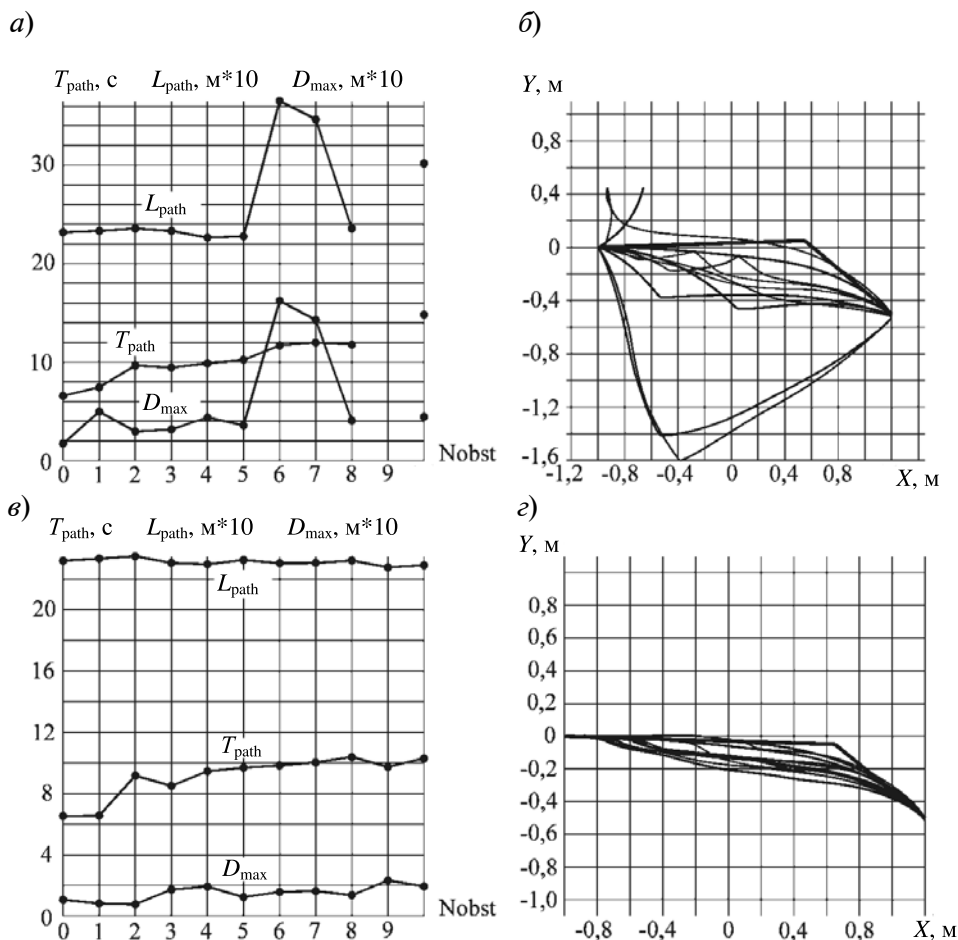


Рис. 1. Результаты моделирования метода эффективного пути

тивную оценку и обратимся к графикам. В данном случае длина пройденного пути практически постоянна, время достижения цели увеличивается незначительно с ростом числа препятствий, а также отклонение от траектории намного меньше, чем в предыдущем случае.

Итак, проведя моделирование, можно сделать вывод о работоспособности метода. Также подтверждается, что модификация для учета подвижных препятствий повысила его надежность и эффективность.

Перейдем к методам оптимального управления. Одна из наиболее успешных реализаций — это универсальный метод динамического окна [3], суть которого заключается в выборе оптимального вектора скорости из допустимой области пространства скоростей, которая получила название «динамическое окно»:

$$V_r = V_s \cap V_a \cap V_d,$$

где V_s — допустимые скорости, ограничены $[0, v_{\max}]$, $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$; V_a — безопасные скорости (движение с ними не приводит к столкновению); V_d — динамические ограничения (по ускорениям).

Этот метод позволяет непосредственно учесть динамику мобильного робота. В основе решения лежит поиск экстремума функционала в динамическом окне:

$$(v^* \omega^*)^T = \arg \text{extr}(G(v, \omega)),$$

где $G(v, \omega)$ — критерий оптимальности — функционал, учитывающий степень совпадения траектории робота со спланированным маршрутом, а также расположение и траектории движения препятствий.

В оригинальной статье предлагается максимизировать функционал следующего вида:

$$G(v, \omega) = \sigma(\alpha \text{ heading}(v, \omega) + \beta \text{ dist}(v, \omega) + \gamma \text{ velocity}(v, \omega)),$$

где $\text{heading}(v, \omega)$ – функционал курса на целевую точку; $\text{dist}(v, \omega)$ – функционал расстояния до ближайшего препятствия; $\text{velocity}(v, \omega)$ – функционал скорости движения робота; α, β, γ – весовые коэффициенты; σ – нормирующий коэффициент.

В работе [4] метод динамического окна скомбинирован с методом эффективного пути и предложен комплексный критерий, учитывающий близость реальной траектории робота к вектору эффективного пути, а также расстояние до препятствия:

$$G(v, \omega) = \lambda \vartheta_{\text{clear}} + (1 - \lambda) \vartheta_{\text{path}},$$

где ϑ_{clear} – функционал длины пути, свободного от препятствий; ϑ_{path} – функционал близости траектории; λ – весовой коэффициент.

Для учета подвижных препятствий, траектории, которые приводят к столкновению, убираются из пространства допустимых скоростей, однако необходимо перепланировать маршрут с препятствиями в новых местах.

Для проверки работоспособности проведено моделирование (рис. 2). Из рисунка видно, что не все эксперименты завершились успешно (рис. 2 а, б). В случае с допущением статичности, в основном, из-за достаточно большого отклонения от спланированного маршрута. Во втором случае (рис. 2 в, г) ошибки реже, но имеются. Как показали исследования, столкновение происходит, когда пространство допустимых скоростей становится пустым, т. е. нет траектории, двигаясь вдоль которой можно избежать столкновения.

Итак, метод динамического окна также является работоспособным, однако менее

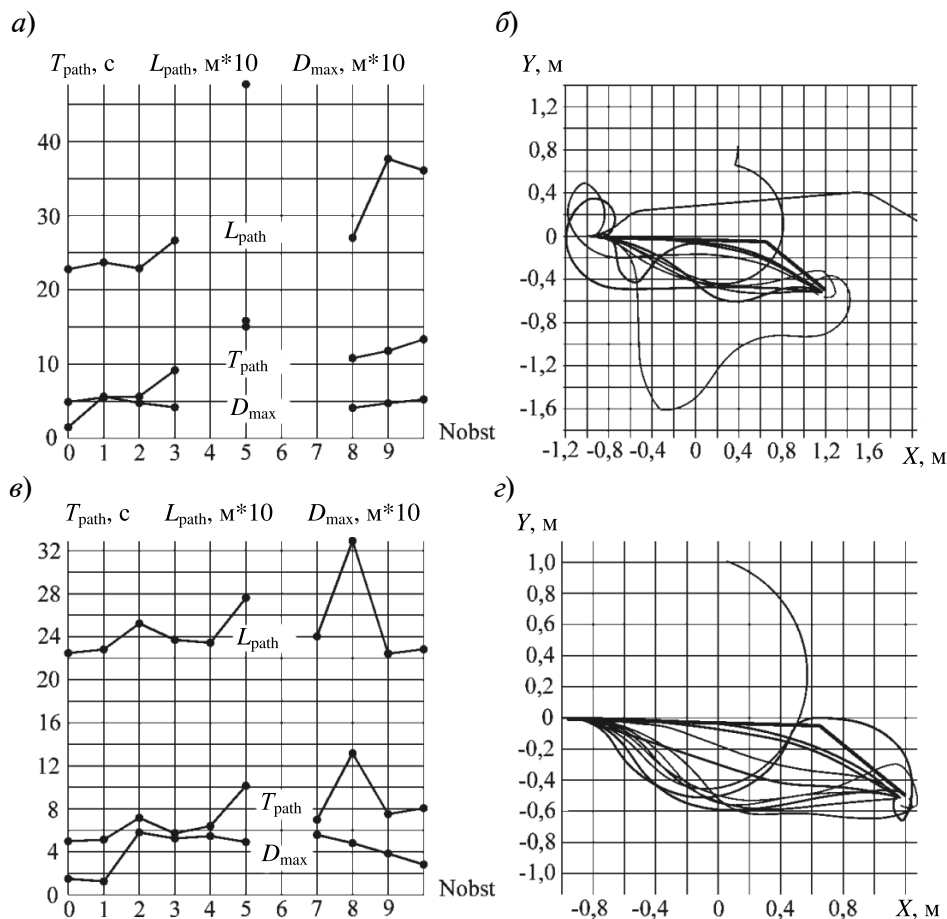


Рис. 2. Результаты моделирования метода динамического окна

надежным, с необходимостью доработки. Преимущество данного метода в его универсальности: можно задать критерий оптимальности движения, необходимый для конкретной задачи. Это может быть минимальное время, кратчайший путь, минимальное отклонение от спланированного маршрута, минимальные энергозатраты и т. п.

Сравним оба метода по результатам моделирования. Метод динамического окна показал себя менее надежным, зато робот достигает цели за более короткое время. Еще один недостаток метода динамического окна — вычислительная сложность.

Перейдем к задаче определения параметров движения препятствий. Эта задача сложная, имеющая множество способов решения в зависимости от типа сенсора, типа входных данных, априорной информации об объекте и т. п. В нашем случае в качестве сенсора используется лазерный дальномер с угловым разрешением 1° и разрешением по дальности 10 мм. Входными данными является массив точек, описывающий рельеф помещения в плоскости измерения. В качестве априорной информации имеется карта помещения, построенная с помощью алгоритма NDT (Normal Distributions Transform — преобразование нормальных распределений) [5]. Также алгоритм SLAM дает текущее положение мобильного робота в системе координат, связанной с помещением, и оценку скорости движения робота.

В результате решения данной задачи необходимо получить список подвижных объектов со следующими параметрами:

- текущее положение;
- текущий вектор скорости;
- геометрические размеры объекта.

Рассмотрим ограничения, которые позволяют значительно упростить решение данной задачи, но при этом решение должно успешно применяться в ранее изложенном алгоритме обхода подвижных препятствий:

1) все препятствия типа «мобильный робот», т. е. подчиняются уравнениям движения трехколесного мобильного робота и достаточно инерционные, т. е. не могут скачкообразно изменить скорость;

2) размеры объекта определяются диаметром габаритной окружности, построенной

таким образом, чтобы охватывать все точки на скане, описывающие данный объект;

3) курс движения препятствия (угол поворота относительно абсолютной системы координат) определяется направлением вектора его линейной скорости;

4) если скорость перемещения препятствия невелика по сравнению с максимальной скоростью мобильного робота, будем считать его статическим в каждый момент времени, т. к. алгоритм обхода статических препятствий допускает медленные изменения расположения препятствий.

Итак, учитывая эти ограничения, необходимо, имея карту помещения, текущий скан и собственное положение робота, найти следующие параметры каждого подвижного препятствия:

- диаметр габаритной окружности W ;
- координаты центра этой окружности (x, y) ;
- курс φ ;
- вектор скорости $(v, \omega)^T$.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать следующий алгоритм:

1. Проинициализировать список подвижных объектов.
2. Ждать новый скан.
3. Из всех точек скана найти такие, которые не попадают на объекты на NDT-карте.
4. Провести кластеризацию этих точек, составить список кластеров.
5. Выявить изолированные точки и удалить их.
6. Для каждого объекта из списка кластеров:
7. Определить диаметр габаритной окружности и ее центр.
8. Из списка объектов найти наиболее близкий по положению и размеру.
9. Если окружности объекта и кластера не пересекаются, создать новый объект и добавить его в список.
10. В противном случае обновить оценку скорости и курса по новому положению объекта.
11. Продолжить цикл по кластерам, перейти к п. 5.
12. Перейти к п. 2.



Рассмотрим подробнее основные пункты предложенного алгоритма. Определение точек скана, принадлежащих подвижным препятствиям, проводится с использованием NDT-карты, которая представляет собой функцию, являющуюся суммой функций нормального распределения точек скана в ячейках карты. Распределение в одной ячейке представляется следующим выражением:

$$p(\bar{x}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma|}} \exp \left(-\frac{(\bar{x} - \bar{\mu})^T \Sigma^{-1} (\bar{x} - \bar{\mu})}{2} \right). \quad (1)$$

На такой карте в местах, где находятся статические препятствия, функция достигает локального максимума, при удалении от препятствий функция монотонно убывает до нуля, а в ячейках, где отсутствуют препятствия, функция тождественно равна нулю.

Для проверки точек скана необходимо определить значение выражения (1). Очевидно, если результат равен нулю, то данная точка не описывает статическое препятствие, следовательно, если карта актуальна, она описывает подвижное препятствие, т. к. другой альтернативы нет. Однако такая простая оценка не всегда эффективна. Существует корреляция между значением функции и принадлежностью точки к подвижному препятствию, но прямой зависимости нет. Рассмотрим различные ситуации.

1. Функция обращается в нуль в данной точке, следовательно:

1) точка относится к подвижному препятствию, если карта актуальна;

2) точка относится к неподвижному препятствию, если есть неточность в карте.

2. Функция близка к нулю, следовательно:

1) точка относится к подвижному препятствию, если оно находится в непосредственной близости от статического;

2) точка относится к неподвижному препятствию из-за погрешности измерения в текущий момент или в момент построения карты.

3. Функция близка к единице или равна единице, следовательно:

1) точка относится к подвижному препятствию, если препятствие не перемещалось во время построения карты, а затем началось движение;

2) точка относится к неподвижному препятствию, в противном случае.

Как видно, по значению функции нельзя однозначно определить принадлежность точки подвижному препятствию, однако, необходимо принять во внимание допущения, сформулированные ранее, а именно допущение 4. При небольшой скорости перемещения объекта и одновременном построении карты мы получим случай 3, и учитывая данное допущение, отнесем точку к неподвижному препятствию. В первых двух случаях привязка точки к статическому препятствию менее вероятна, чем к подвижному, и связано это с неточностями и погрешностями измерений. Кроме того, случайное определение статического препятствия в качестве динамического добавит вычислительную нагрузку, но в дальнейшем алгоритм не будет его обрабатывать, оценив скорость его перемещения, которая в идеале равна нулю. Также если точка, неверно отнесенная к подвижному препятствию, будет в своей окрестности единственной, необходимо исключить ее из рассмотрения.

Подводя итог рассуждениям, можно сделать следующий вывод: *точка скана считается принадлежащей подвижному препятствию, если значение функции нормального распределения близко к нулю в данной точке.* На практике необходимо задать некоторый порог, который эмпирически определяется, исходя из вероятности допустимого ошибочного определения.

Следующий важный этап обработки полученных точек — это кластеризация. Основная цель кластеризации — сгруппировать точки по некоторому признаку. Также данный алгоритм позволяет выявить изолированные точки. Нам необходимо кластеризовать точки, принадлежащие одному объекту. Имея только дальнометрический скан, очевидным способом является классификация по евклидовому расстоянию между соседними точками. Исходя из характеристик лазерного дальномера, приближенно рассчитаем порог допустимо-

го расстояния между соседними точками. Найдем расстояние между соседними точками скана на объекте, находящемся в 3 м от робота, учитывая угловое разрешение лазерного дальномера в 1° ,

$$d_{\max} = L \cdot \Delta\varphi \approx 3 \cdot 0,0175 \approx 0,05 \text{ м.}$$

Данный порог следует считать исходным значением для эмпирического подбора, т. к. характер принадлежности точек одному объекту вероятностный.

После получения кластеров точек на следующем этапе необходимо определить параметры габаритной окружности. На расчетной схеме (рис. 3) показаны точки скана, относящиеся к некоторому подвижному препятствию $\{P_i : i = 1, \dots, n\}$, габаритная окружность с центром в точке C и радиусом R , которая описывает эти точки и которую требуется найти. В точке O находится начало координат лазерного дальномера; ρ — расстояние до крайней точки скана; L — расстояние до центра C габаритной окружности; a — половина расстояния между крайними точками скана P_1 и P_n .

Расчет основан на том факте, что видимая дуга окружности на концах касается линии луча лазерного дальномера. Обозначим угол обзора объекта из точки O как 2β . Тогда половина этого угла равна углу между радиусом CP_1 и хордой, соединяющей крайние точки P_1P_n . Выражая неизвестные параметры через измеренные, получим выражения для расчета расстояния до центра габаритной окружности объекта, а также ее радиуса:

$$L = \frac{\rho^2}{\sqrt{\rho^2 - a^2}}, \quad R = \sqrt{L^2 - \rho^2}.$$

Положение точки C найдем, отложив на биссектрисе угла P_1OP_n расстояние L .

Итак, получив положение подвижного препятствия и его размер, необходимо проверить, имеется ли похожий объект в списке. Проверка проводится по двум критериям:

- расстояние между центрами объекта в списке и проверяемого не должно превышать некоторого порога, который определяется максимальной скоростью движения препятствия и частотой получения сканов от лазерного дальномера;
- габаритный размер объекта в списке отличается от проверяемого не более, чем на заранее определенное значение.

Если этим критериям удовлетворяют несколько объектов в списке, выбирается наиболее близкий по расстоянию и размеру. Кроме того, при этом можно использовать предсказание положения объекта из списка, если имеется оценка его скорости и курса.

Для использования в данном алгоритме предлагается упрощенный вариант оценки скорости, т. к. много вычислительных ресурсов используется для решения рассмотренных выше проблем. Сначала определяем разность положений нового объекта и старого, затем, зная период измерений h , находим грубую оценку скоростей по двум координатам:

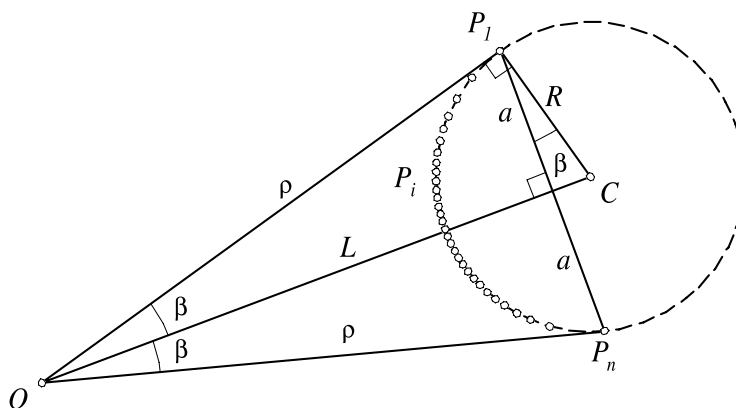


Рис. 3. Расчетная схема определения параметров габаритной окружности



$$\dot{x}_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{h}, \quad \dot{y}_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{h}.$$

Учитывая инерционность препятствия, что было допущено при постановке задачи, к грубой оценке скорости применим ФНЧ (фильтр нижних частот) для снижения шума дискретного аналога дифференцирования, используя следующие рекуррентные выражения:

$$\hat{x}_i = \lambda \hat{x}_{i-1} + (1 - \lambda) \dot{x}_i, \quad \hat{y}_i = \lambda \hat{y}_{i-1} + (1 - \lambda) \dot{y}_i,$$

где $\dot{x}_i, \dot{y}_i$ — текущие измеренные скорости перемещения по каждой координате; $\hat{x}, \hat{y}$ — фильтрованные оценки скорости; $\lambda \in (0; 1)$ — характеристика фильтра, определяющая частоту среза.

Теперь, подставляя в стандартные уравнения кинематики трехколесного мобильного робота полученные оценки вместо $\dot{x}, \dot{y}$, получим следующие выражения для расчета оценки текущего вектора скорости $(\hat{v}_i, \hat{\omega}_i)^T$:

$$\hat{v}_i = \sqrt{\hat{x}_i^2 + \hat{y}_i^2}, \quad \varphi_i = \arctg\left(\frac{\hat{y}_i}{\hat{x}_i}\right),$$
$$\hat{\omega}_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{h}.$$

Из-за повторного дифференцирования при расчете $\hat{\omega}$ необходимо также пропустить это значение через ФНЧ:

$$\hat{\omega}_i = \lambda_{\omega} \hat{\omega}_{i-1} + (1 - \lambda_{\omega}) \hat{\omega}_i.$$

Итак, получены все необходимые параметры подвижных объектов для метода управления мобильным роботом в среде с подвижными препятствиями. Однако у данного алгоритма есть существенные недостатки, связанные с ограничениями по типу подвижных препятствий, их форме, модели движения. Несмотря на эти недостатки, предложенный алгоритм позволяет поставить эксперимент на реальном роботе в реальном помещении для оценки работоспособности метода управления движением мобильного робота в динамической среде.

Таким образом, при исследовании методов управления движением были получены следующие результаты.

Метод эффективного пути работоспособен и надежен, прост в реализации, не требователен к вычислительным ресурсам, но не является универсальным.

Метод динамического окна также работоспособен, менее надежен (в текущей реализации), требует больше вычислительных ресурсов, но робот достигает цели за более короткий промежуток времени в среде с большим количеством подвижных препятствий; также метод является универсальным в плане выбора критерия оптимальности.

Предложен алгоритм определения параметров подвижных объектов по дальнометрическому изображению и карте помещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seder, M. Motion control of mobile robots in indoor dynamic environments [Text] / M. Seder, I. Petrovic, K. Macek // Proc. of the Internat. Conf. on Electrical Drives and Power Electronics. — Dubrovnik, Croatia, 2005.
2. Герасимов, В.Н. Решение задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий [Текст] / В.Н. Герасимов, Б.Б. Михайлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. — 2012. — С. 83–92.
3. Fox, D. The dynamic window approach to

collision avoidance [Text] / D. Fox, W. Burgard, S. Thrun // Robotics & Automation Magazine IEEE. — 1997. — Т. 4. — P. 23–33.

4. Seder, M. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles [Text] / M. Seder, I. Petrovic // Proc. of the 2007 IEEE Internat. Conf. on Robotics & Automation. — 2007. — P. 1986–1991.

5. Biber, P. The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching [Text] / P. Biber, W. Strasser // Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Internat. Conf. — 2003. — Т. 3. — P. 2743–2748.

REFERENCES

1. Seder M., Petrovic I., Macek K. Motion control of mobile robots in indoor dynamic environments / Proc. of the Internat. Conf. on Electrical Drives and Power Electronics. — Dubrovnik, Croatia, 2005.

2. Gerasimov V.N., Mikhailov B.B. Reshenie zadachi upravleniya dvizheniem mobilnogo robota pri nalichii dinamicheskikh prepyatstviy [The solution of mobile robot motion control problem in presence

of dynamic obstacles] / Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Priborostroenie. — 2012. — S. 83–92. (rus)

3. **Fox D., Burgard W., Thrun S.** The dynamic window approach to collision avoidance / Robotics & Automation Magazine IEEE. — 1997. — Т. 4. — P. 23–33.

4. **Seder M., Petrovic I.** Dynamic window based

approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles / Proc. of the 2007 IEEE Internat. Conf. on Robotics & Automation. — 2007. — P. 1986–1991.

5. **Biber P., Strasser W.** The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching / Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Internat. Conf. — 2003. — Т. 3. — P. 2743–2748.

ГЕРАСИМОВ Владимир Николаевич — аспирант *Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.*

105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

E-mail: vovka_ok@list.ru

GERASIMOV Vladimir N. *Bauman Moscow State Technical University.*

105005, 2-ya Baumanskaya Str. 5, Moscow, Russia.

E-mail: vovka_ok@list.ru



УДК 004.896:535.8

Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ВИЗУАЛЬНЫМ ОДОМЕТРОМ

E.A. Devyaterikov, B.B. Mikhailov

MOBILE ROBOT MOVEMENT CONTROL SYSTEM WITH VISUAL ODOMETER

Представлена экспериментальная проверка визуального одометра, функционирующего в качестве датчика обратной связи по положению в системе управления мобильного робота. Визуальная одометрия — метод измерения координат с помощью технического зрения, основанный на измерении смещения ключевых точек пространства, информация о которых получается из анализа последовательности изображений. Такая система работает в заранее не подготовленной, недетерминированной среде, нечувствительна к проскальзыванию колес. Приведены структура и краткое описание реализованной системы управления, а также результаты эксперимента.

СТЕРЕОЗРЕНИЕ. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ. ОДОМЕТРИЯ. ВИЗУАЛЬНАЯ ОДОМЕТРИЯ. ИЗМЕРЕНИЕ ПУТИ. МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ.

The paper presents test of visual odometer that operates as position feedback sensor in mobile robot control system. Visual odometry is a path recovering approach based on computer vision and calculating of surroundings keypoints flow. The keypoints data comes from image sequence processing. Such system capable of working in unprepared nondeterministic environment and wheels slipping insensitive. The paper consists of implemented system description and results of it's testing.

STEREOVISION. COMPUTER VISION. ODOMETRY. VISUAL ODOMETRY. TRAJECTORY RECOVERING. MOBILE ROBOT.

Для управления мобильным роботом в случае движения по траектории необходима система определения местоположения и ориентации в пространстве. В настоящее время для навигации широко используются [1]: энкодеры, инерциальные системы, GPS и дальномеры. Но перечисленные устройства имеют свои недостатки. Использование энкодеров невозможно при проскальзывании колес. Инерциальные системы накапливают ошибку. GPS недостаточно точна для локальной навигации, неустойчива в закрытых помещениях. Система с дальномером имеет высокую стоимость и сложна.

Рост производительности встраиваемых вычислительных решений позволяет обрабатывать видеоданные бортовой системы технического зрения робота в реальном

времени [2] и использовать их для решения все более сложных задач, в т. ч. и для навигации.

Метод визуальной одометрии [2–5] основан на измерении смещения ключевых точек в пространстве [6], информация о которых получается из анализа последовательности стереоизображений системы технического зрения. Такая система может работать в недетерминированной среде, позволяет решать сопряженные задачи, такие, как, например, построение карты помещения.

В [7, 8] предложен метод визуальной одометрии, позволяющий вычислять текущие координаты мобильного робота с помощью системы трехмерного технического зрения. Был собран макет визуального одометра, проверены его работоспособность,

точность и быстродействие. Результаты показали, что визуальный одометр позволяет с частотой 10 Гц измерять перемещение робота с точностью 7 % и угол курса с точностью 10 %. В этом эксперименте визуальный одометр не был задействован в контуре системы управления робота. Точность и время вычисления координат оценивались независимо.

Для оценки возможности использования предложенного способа измерения пути как датчика обратной связи по положению в [9] была смоделирована система управления для того же лабораторного трехколесного робота, который использовался в эксперименте, но с визуальным одометром в обратной связи. В модели были учтены несовершенства визуального одометра: дискретизация измерений по времени; квантование, обусловленное разрешением телекамер; внесены шумы, имитирующие неточности в каждой итерации. Результаты моделирования оказались удовлетворительными. Система оставалась устойчивой, даже если время обработки изображений достигало 0,3 с, что в три раза больше реальной характеристики. Относительная ошибка выхода в заданную точку при моделировании движения по траектории с несколькими поворотами составила 14 %.

Цель данной работы – экспериментальная проверка мобильного робота с визуальным одометром в обратной связи по положению. Для достижения этой цели по-

ставлены и решены следующие задачи:

- реализация системы управления мобильным роботом с использованием данных визуальной одометрии в обратной связи по положению;
- проверка работоспособности такой системы, определение ее точности.

Система управления с визуальным одометром

Отдельные блоки системы управления рассчитаны и смоделированы еще в [9]. В настоящей работе они приведены в более удобный вид для использования с реальным роботом. Линейная и угловая скорости робота ограничены в соответствии с возможностью телекамеры получать изображения без смазываний. Чтобы подчеркнуть независимость работы визуального одометра от проскальзывания колес и других несовершенств шасси, мы не регулировали конструкцию перед экспериментом. Радиусы колес отличаются от заданных в модели более чем на 5 %. Имеет место люфт колес $\pm 5^\circ$. Оси колес не совпадают. Основные характеристики робота представлены в табл. 1.

Также был реализован интерфейс обмена данными между компьютером и существующей мобильной платформой. Схема полученной системы управления показана на рис. 1.

Система состоит из следующих блоков:

1. Группа блоков «ПК» (персональный компьютер) реализована в программном

Таблица 1

Характеристики мобильного робота

Характеристика	Обозначение	Величина	Единицы измерения
Масса робота	m	30	кг
Радиус приводного колеса	r	$0,105 \pm 0,005$	м
Люфт колеса	γ	± 5	°
Расстояние между приводными колесами	l	0,370	м
Мощность каждого привода	P_n	30	Вт
Ограничение максимальной скорости робота	$V_{\max}$	0,1	м/с
Ограничение максимальной угловой скорости робота	$\omega_{\max}$	0,1	рад/с

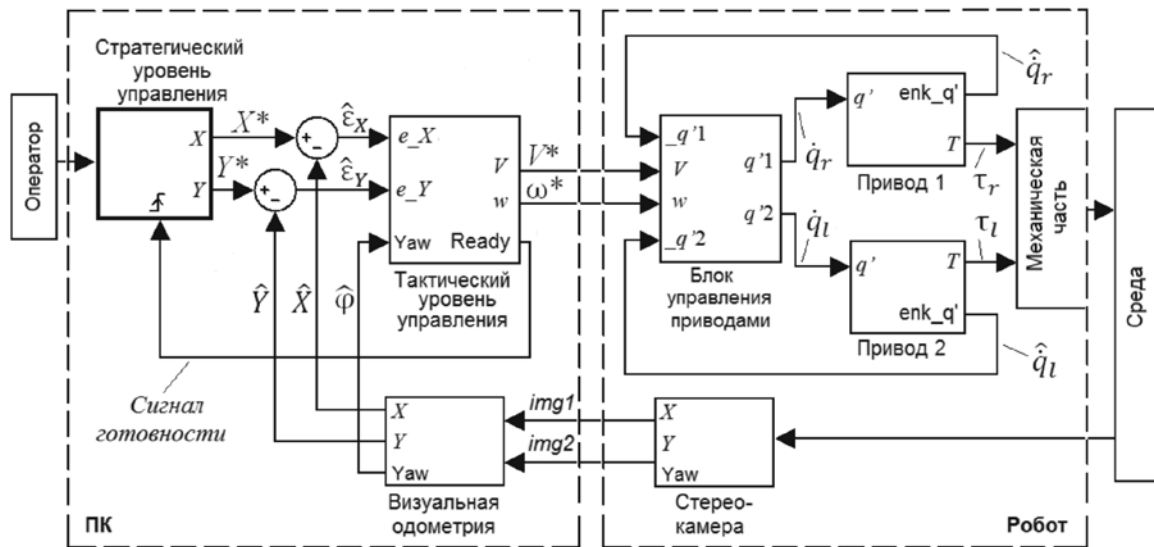


Рис. 1. Система управления мобильного робота с визуальным одометром

виде на мобильном компьютере (ноутбуке), устанавливаемом на роботе. Оператор записывает координаты целевых точек траектории в текстовый файл. Далее робот движется в автоматическом режиме.

1.1. «Стратегический уровень управления» выдает на выходе координаты X^* и Y^* очередной точки.

1.2. «Тактический уровень управления» на основе оценок ошибок по положению $\hat{\varepsilon}_x$, $\hat{\varepsilon}_y$ и оценки текущего угла курса робота $\hat{\varphi}$ формирует сигналы управления линейной V^* и угловой ω^* скоростями; в состав блока входит также программный интерфейс обмена данными с роботом.

1.3. «Визуальная одометрия» — блок, реализующий алгоритм визуальной одометрии. Блок оценивает текущие координаты $\hat{X}$, $\hat{Y}$ и угол курса робота $\hat{\varphi}$, анализируя последовательность пар изображений $img1$ и $img2$, поступающих со стереокамеры.

2. Группа блоков «Робот» подключается к ПК через два USB порта (один для телекамеры и один для платы робота).

2.1. «Блок управления приводами» — вычислительное устройство, пересчитывающее поступающие с ПК V^* и ω^* в угловые скорости $\dot{q}_l$ левого и $\dot{q}_r$ правого приводов. Здесь реализована локальная обратная связь по скорости: с энкодеров приводов принимаются оценки угловых скоростей $\hat{\dot{q}}_l$ левого и $\hat{\dot{q}}_r$ правого колес.

2.2. «Привод 1(2)» состоит из мотор-редуктора, энкодера и силового драйвера;

2.3. Под блоком «Механическая часть» понимается конструкция робота.

Кинематическая и динамическая модели робота, на основе которых рассчитан тактический уровень управления, приведены в [9]. Принцип управления дискретно-позиционный. Робот движется в очередную точку дискретно заданной траектории. Принято, что боковое проскальзывание колес отсутствует, управление осуществляется по двум координатам: расстоянию до цели и углу курса на цель.

Результаты экспериментальных исследований

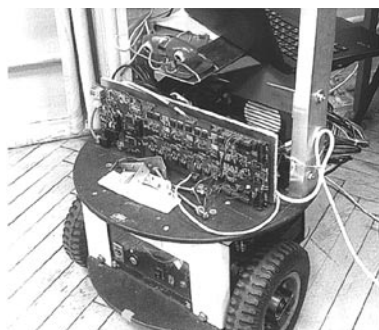
Объектом управления является существующий лабораторный трехколесный мобильный робот (рис. 2 а), использовавшийся в предыдущих экспериментальных исследованиях.

Состав системы:

1. Стереокамера Minogu 3D Webcam: КМОП матрица, разрешение 640×480 пикселей (макс. 800×600), стереобаза 60 мм. Камеры не синхронизированы [10], максимальное рассогласование по времени 16,5 мс. Горизонтальный угол обзора 42°. Угол наклона телекамер к горизонту 20°. Изображения с телекамер показаны на рис. 2 б.

2. Компьютер на базе процессора

а)



б)

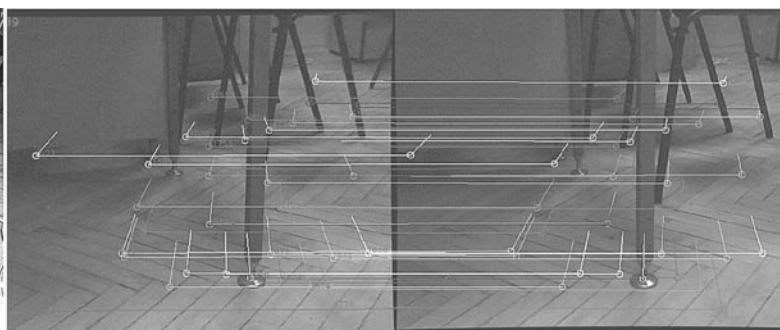


Рис. 2. Лабораторный мобильный робот с визуальным одометром — а; изображения с телекамер и иллюстрация поиска особых точек — б

Intel Core i3-2330M 2,2 ГГц, 1 поток.

3. Лабораторный мобильный робот с реализованным исполнительным уровнем управления. Характеристики робота см. в табл. 1.

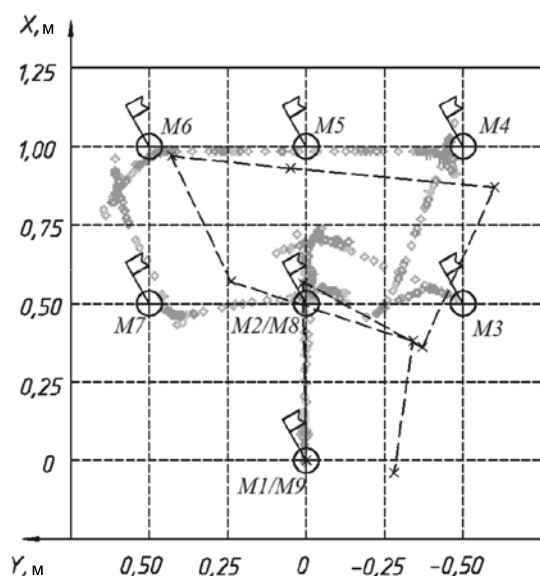
Эксперимент проводился в закрытом помещении. Робот девять раз проехал по дискретно заданной замкнутой траектории $M1, M2, \dots, M5$ (рис. 3 а) с участками длиной 0,5 м и шестью поворотами на 90° .

Траектория движения между точками не задавалась, определялась только на так-

тическом уровне и не учитывалась в этом эксперименте. Оценивалась относительная ошибка выхода в исходную точку. Измерения проводились в моменты остановки робота в заданных точках, для чего на подстилающей робот вручную устанавливался в начальное положение.

На рис. 3 а представлены результаты одного из девяти экспериментов. Реальные координаты робота в точках остановки обозначены крестами и для наглядности соединены пунктиром. На траектории,

а)



б)

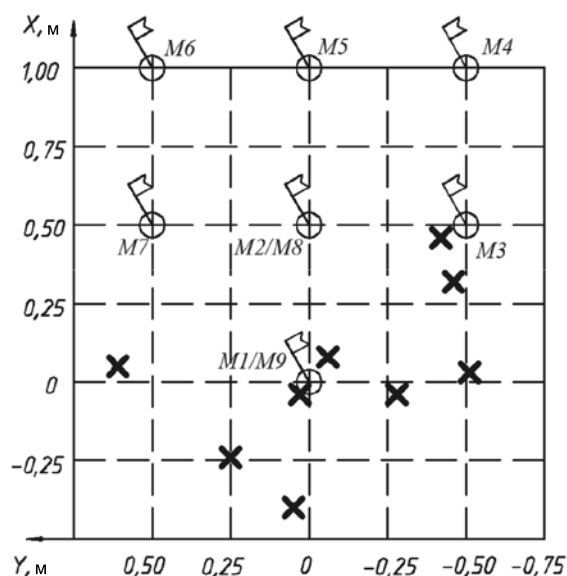


Рис. 3. Результаты эксперимента:

а — сопоставление заданных координат, показаний визуального одометра и реально достигнутых точек в одном из заездов; б — конечные точки в девяти заездах

(•) — показания визуального одометра; (⊕) — заданные точки; (×) — реальные точки; (X) — конечные точки



Таблица 2

Результаты девяти заездов

Номер заезда	Длина траектории, м	Количество поворотов на 90°	Конечные координаты		Ошибка выхода в исходную точку	
			X, м	Y, м	Абсолютная, м	Относительно длины траектории, %
1	4	6	−0,21	0,40	0,45	11
2			−0,24	0,25	0,35	9
3			−0,40	0,05	0,40	10
4			0,05	0,61	0,61	15
5			0,08	−0,06	0,10	2
6			−0,04	−0,03	0,05	1
7			0,46	−0,42	0,62	16
8			0,32	−0,46	0,56	14
9			0,03	−0,51	0,51	13
Средняя относительная ошибка без учета выбросов						13

измеренной визуальным одометром, в местах поворотов наблюдаются петли. Это не ошибка измерения. Как было сказано выше, шасси робота намеренно не отрегулированы: диаметры колес и положения их осей отличаются, характеристики приводов не соответствуют модели, имеет место люфт колес ($\pm 5^\circ$) и т. д., поэтому, когда поступает сигнал поворота на месте, робот совершает и значительное поступательное движение. Тем не менее такое незапланированное перемещение фиксируется визуальным одометром и траектория корректируется. Из рисунка видно, что ошибка выхода в исходную точку не превышает 0,3 м при заданной длине траектории 4 м (7,5 %). Результаты всех заездов представлены в табл. 2.

Из таблицы видно, что средняя ошибка выхода в исходную точку в семи экспериментах (без учета заездов 5 и 6, которые примем за выбросы) составляет 13 %

от длины траектории. На рис. 3 б показано множество конечных положений робота во всех девяти заездах.

В ходе работы реализована система управления мобильным роботом с визуальным одометром в обратной связи по положению. Эта система проверена экспериментально, определена ее точность при решении задачи объезда конкретной траектории длиной 4 м с шестью поворотами на 90°. Средняя ошибка выхода робота в исходную точку составила 13 % от длины траектории. При этом к конструкции робота не предъявлялись какие-либо специальные требования: диаметры колес отличались более чем на 5 % от заданных в модели; люфт колес достигал 10°. Результат носит предварительный характер, но подтверждает, что визуальный одометр может использоваться в системе управления мобильного робота в качестве датчика обратной связи по положению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siciliano, B. Springer handbook of robotics [Text] / B. Siciliano, O. Khatib. — Springer-Verlag Berlin, 2008. — P. 477–580.
2. Nistrer, D. Visual odometry for ground vehicle applications [Text] / D. Nistrer, O. Naroditsky, J. Bergen // J. of Field Robotics. — 2006. — Vol.

23(1). — P. 3–20.

3. Xu, J. Robust stereo visual odometry for autonomous rover [Text] / J. Xu, M. Shen, W. Wang, L. Yang [et al.] // 6th WSEAS Internat. Conf. on Signal, Speech and Image Processing. — 2006.

4. Hirschmuller, H. Fast, unconstrained Camera

Motion Estimation from stereo without Tracking and Robust Statistics [Text] / H. Hirschmuller // 7th Internat. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision. — 2002. — Т. 2. — P. 1099–1104.

5. **Bota, S.** Camera Motion Estimation Using Monocular and Stereo-Vision [Text] / S. Bota, S. Nedevschi // 4th Internat. Conf. on Intelligent Computer Communication and Processing. — 2008. — P. 275–278.

6. **Bradski, G.** Learning OpenCV [Text] / G. Bradski, A. Kaehler // Newgen Publishing and Data Services, 2008.

7. **Девятериков, Е.А.** Система технического стереозрения для измерения координат мобильного робота [Текст] / Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов // Техническое зрение в системах

управления 2012: Сб. трудов НТК. — М., 2012. — С. 72–78.

8. **Девятериков, Е.А.** Визуальный одометр [Текст] / Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. — 2012. — Спецвып. — № 6. — С. 68–82.

9. **Девятериков, Е.А.** Использование данных визуального одометра в системе управления мобильного робота [Текст] / Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов // Экстремальная робототехника 2012: Сб. трудов НТК. — СПб., 2012. — С. 155–163.

10. Minoru 3D Webcam [Электронный ресурс] / Norishige Fukushima's web site // Режим доступа: <http://nma.web.nitech.ac.jp/fukushima/minoru/minoru3D-e.html>

REFERENCES

1. **Siciliano B., Khatib O.** Springer handbook of robotics. — Springer-Verlag Berlin, 2008. — P. 477–580.

2. **Nistrer D., Naroditsky O., Bergen J.** Visual odometry for ground vehicle applications / Journal of Field Robotics. — 2006. — Vol 23(1). — P. 3–20.

3. **Xu J., Shen M., Wang W., Yang L., Liu J., Kalyaev I.** Robust stereo visual odometry for autonomous rover / 6th WSEAS Internat. Conf. on Signal, Speech and Image Processing, 2006.

4. **Hirschmuller H.** Fast, unconstrained Camera Motion Estimation from stereo without Tracking and Robust Statistics / 7th Internat. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. — Vol. 2. — P. 1099–1104.

5. **Bota S., Nedevschi S.** Camera Motion Estimation Using Monocular and Stereo-Vision / 4th Internat. Conf. on Intelligent Computer Communication and Processing. — 2008. — P. 275–278.

6. **Bradski G., Kaehler A.** Learning OpenCV. — Newgen Publishing and Data Services, 2008.

7. **Devyaterikov E.A., Mikhailov B.B.** Sistema tehnikeskogo zreniya dlya izmereniya koordinat mobilnogo robota / Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravleniya 2012: Sb. Trudov NTK. — Moscow, 2012. — S. 72–78. (rus)

8. **Devyaterikov E.A., Mikhailov B.B.** Vizualniy Odometr / Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Priborostroenie. — 2012. — Spec. Vip. — № 6. — S. 68–82. (rus)

9. **Devyaterikov E.A., Mikhailov B.B.** Ispolzovanie dannikh vizualnogo odometra v sisteme upravleniya mobilnogo robota. Ekstremalnaya robototekhnika 2012: Sb. Trudov NTK. — St.-Petersburg, 2012. — S. 155–163. (rus)

10. Minoru 3D Webcam, Norishige Fukushima's web site, Available <http://nma.web.nitech.ac.jp/fukushima/minoru/minoru3D-e.html>

ДЕВЯТЕРИКОВ Егор Анатольевич — аспирант кафедры роботов и робототехнических систем Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

105037, Россия, Москва, Измайловская пл., д. 7.

E-mail: retegor@mail.ru

DEVYATERIKOV, Egor A. Bauman Moscow State Technical University.

105037, Izmaylovskaya square 7, Moscow, Russia.

E-mail: retegor@mail.ru

МИХАЙЛОВ Борис Борисович — доцент кафедры роботов и робототехнических систем Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, кандидат технических наук.

105037, Россия, Москва, Измайловская пл., д. 7.

E-mail: robot@bmstu.ru

MIKHAILOV, Boris B. Bauman Moscow State Technical University.

105037, Izmaylovskaya square 7, Moscow, Russia.

E-mail: robot@bmstu.ru



УДК 62-503.5

С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, Л.Ю. Волкова, А.В. Ворочаев

ЭТАПЫ ДВИЖЕНИЯ ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО РОБОТА, ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ С ОТРЫВОМ ОТ ПОВЕРХНОСТИ

S.F. Jatsun, O.G. Loktionova, L.Yu. Volkova, A.V. Vorochaev

STAGES OF MOVEMENT OF THE FOURLINK ROBOT MOVING WITH THE JUMP FROM THE SURFACE

Приведена расчетная схема четырехзвеного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности, прыжок устройства описан в виде последовательности этапов, на каждом из которых звенья робота совершают определенные виды движения, разработана математическая модель в виде дифференциальных уравнений, описывающих движение робота на всех этапах, представлены результаты численного моделирования прыжка в соответствии с указанной последовательностью этапов.

ПРЫГАЮЩИЙ МНОГОЗВЕННЫЙ РОБОТ. ЭТАПЫ ПРЫЖКА. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЭТАПОВ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЫЖКА. ВЫСОТА. ДЛИНА.

The settlement scheme of the four-link robot moving with a jump from a surface is provided, the jump of the device is described in the form of sequence of stages, on each of which links of the robot make certain types of movement, the mathematical model in the form of the differential equations describing movement of the robot at all stages is developed, results of numerical modeling of a jump according to the specified sequence of stages are presented.

MULTILINK JUMPING ROBOT. STAGES OF THE JUMP. SEQUENCE OF STAGES. CHARACTERISTICS OF THE JUMP. HEIGHT. LENGTH.

Интерес к прыгающим роботам в последние годы все время возрастает, проектируются и исследуются различные по конструкции и способу прыжка роботы, параметры прыжка которых также сильно отличаются. Общим для большинства ученых, занимающихся прыгающими системами, является представление прыжка робота в виде некоторой последовательности этапов, каждый из которых характеризуется особым видом движения звеньев. Так, в [1] рассматриваются четыре этапа: подготовка к прыжку при нахождении объекта на поверхности, разгон устройства до отрыва от поверхности, движение при отсутствии взаимодействия с поверхностью, приземление. Аналогичные этапы прыжка описываются в [2]. Один прыжок робота представлен в виде последовательности восьми этапов в [3]: подготовка к прыжку, разгон, переход из состояния, когда объект взаимодействует с поверхностью, к отрыву от поверхности,

отрыв от поверхности, полет вверх, полет вниз, приземление. Миниатюрный робот-кузнечик, описанный в [4], совершает один прыжок за три этапа: подготовка к прыжку, разгон, движение в воздухе. В [5] прыжок робота характеризуется двумя этапами: нахождение на поверхности и движение с отрывом от нее, которые связывают два перехода — разгон и приземление.

Прыжок изученного в данной статье многозвеного прыгающего робота представлен в виде последовательности восьми этапов, каждому из которых соответствуют определенные виды движения звеньев, описанные в виде математической модели с учетом наложенных на этапах связей.

Расчетная схема робота

Рассматривается аппарат, состоящий из прыжкового и колесных модулей, трехмерная модель которого приведена на рис. 1 а. Прыжковый модуль состоит из звеньев 1–4,

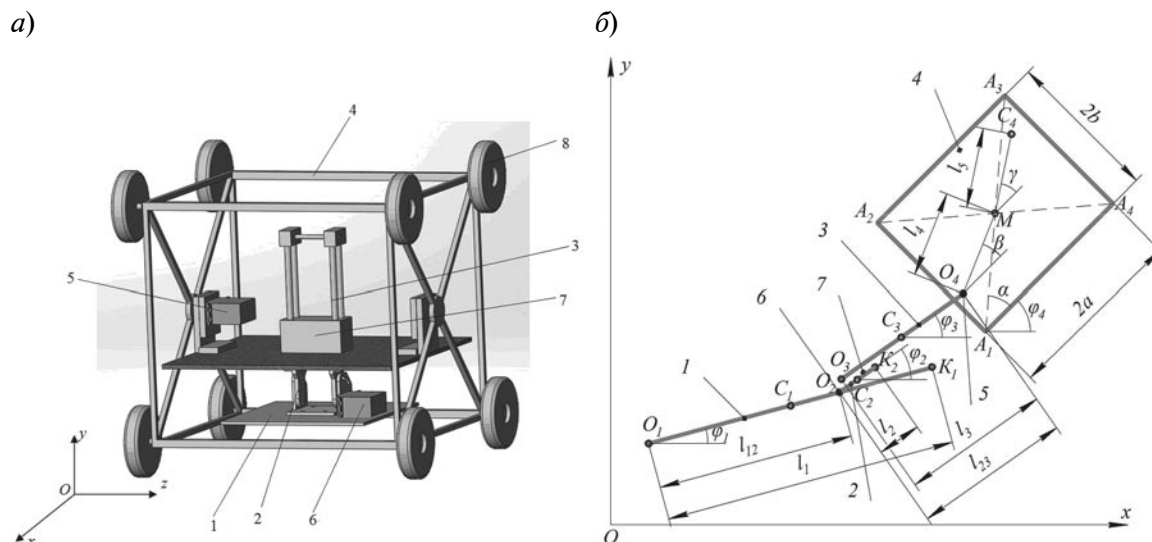


Рис. 1. Четырехзвенный прыгающий робот: а – конструктивная схема; б – расчетная схема
1–4 – звенья, 5–7 – приводы

причем звено 1 является стопой, звенья 2 и 3 образуют ногу, а звено 4 представляет собой корпус. На звеньях 4 и 2 закреплены приводы вращательного движения 5 и 6 соответственно, обеспечивающие поворот звеньев 3 и 1 относительно звеньев 4 и 2. На звене 2 также установлен привод поступательного движения 7, позволяющий звеньям 2 и 3 перемещаться друг относительно друга.

Корпус представляет собой каркас в форме параллелепипеда, в вершинах которого установлены колесные модули 8. Движение объекта по поверхности происходит за счет колес, для преодоления препятствий используется прыжковый модуль.

Движение робота происходит в вертикальной плоскости Oxy с горизонтальной шероховатой абсолютно твердой поверхности, совпадающей с осью Ox (рис. 1 б). Звенья $i = 1 \div 3$ представляют собой стержни длинами l_i , а звено 4 имеет вид прямоугольника с размерами $2a \times 2b$. Массы m_i , $i = 1 \div 3$, звеньев сосредоточены в центрах их симметрии – точках C_i . Центр масс корпуса находится в точке C_4 , смещенной относительно центра симметрии прямоугольника (точки M) на расстояние l_5 под углом γ , определяемым как угол между прямой MC_4 и стороной корпуса A_1A_4 . Длина ноги определяется расстоянием l_{23} между точка-

ми O_2 и O_4 , положение последней в корпусе задается расстоянием l_4 и углом β между прямой, соединяющей точки M и O_4 , и стороной корпуса A_1A_4 [6–9].

Взаимодействие робота с опорной поверхностью

При нахождении робота на поверхности взаимодействие с последней может происходить звеном 1 или 4. При этом возникают силы трения и нормальной реакции. Будем считать, что наличие в вершинах каркаса корпуса колес не оказывает влияния на общие принципы реализации прыжка, поэтому учитывать их размеры, форму, положение точек закрепления в корпусе не будем. При этом положим, что колеса обеспечивают точечный контакт корпуса с поверхностью, причем контактными точками являются крайние точки стороны корпуса, параллельной поверхности, условно обозначим их K и P , или одна из крайних точек корпуса K , если ни одна из его сторон не параллельна поверхности. Примем допущение, что в первом случае в двух точках опоры будут возникать нормальные реакции N_K и N_P , а сила трения F_{fr} только в одной из них – точке K , а во втором случае точка контакта K представляет собой центр приведения сил трения и нормальной реакции.



При взаимодействии с поверхностью звена 1 нормальная реакция является силой, распределенной по площади соприкосновения. В качестве центров ее приведения будем рассматривать крайние точки звена 1, условно K и P , сила трения при этом возникает только в одной контактной точке K . Если взаимодействие звена 1 с поверхностью является точечным, то эта точка является точкой приложения сил трения и нормальной реакции так же, как и для звена 4.

Положим, что возникающая сила трения описывается следующей моделью [10–12]:

$$F_{frK} = \begin{cases} -fN_K \operatorname{sgn}(\dot{x}_K), & \text{если } \dot{x}_K \neq 0; \\ -F_0, & \text{если } \dot{x}_K = 0, |F_0| \leq fN_K; \\ -fN_K \operatorname{sgn}(F_0), & \text{если } \dot{x}_K = 0, |F_0| > fN_K, \end{cases} \quad (1)$$

где F_0 — горизонтальная проекция равнодействующей всех сил, кроме силы сухого трения, приложенных к звену, взаимодействующему с поверхностью; f — коэффициент трения скольжения; N_K — нормальная реакция в точке K ; $\dot{x}_K$ — скорость точки K вдоль оси Ox .

При нахождении одного из звеньев 1 или 4 на поверхности возможны несколько вариантов движения объекта (подэтапов):

1. Звено неподвижно лежит на поверхности и взаимодействует с ней в двух точках. Это возможно в том случае, когда нормальные реакции в точках контакта имеют некоторые положительные значения, а модуль силы трения не превышает предельного значения

$$(N_K > 0) \wedge (N_P > 0) \wedge (|F_{frK}| < F_0). \quad (2)$$

2. Звено взаимодействует с поверхностью в двух точках и перемещается вдоль оси Ox . Такой вариант будет наблюдаться при положительных нормальных реакциях в обеих точках контакта и при превышении предельной силы трения:

$$(N_K > 0) \wedge (N_P > 0) \wedge (|F_{frK}| \geq F_0). \quad (3)$$

3. Звено контактирует с поверхностью в одной точке, которая неподвижна. Такой

вид взаимодействия с поверхностью возможен, если одна из нормальных реакций обнуляется, а сила трения в опоре по модулю меньше предельной:

$$(N_K > 0) \vee (N_P = 0) \wedge (|F_{frK}| < F_0). \quad (4)$$

4. Звено взаимодействует с поверхностью в одной точке, которая движется вдоль оси Ox . Это происходит, когда нормальная реакция в одной из контактных точек становится равной нулю и опора отрывается от поверхности, а сила трения в оставшейся контактной точке имеет значение, по модулю большее, чем предельная сила трения

$$(N_K > 0) \vee (N_P = 0) \wedge (|F_{frK}| \geq F_0). \quad (5)$$

Рассмотрим случай, когда значение силы трения всегда меньше предельного $|F_0| < fN$, то есть скольжения звена робота, контактирующего с поверхностью, не происходит.

Математическая модель прыжка робота

Для разработки математической модели запишем матрицу-столбец координат g , представляющую собой матрицу восьми координат, при помощи которых можно описать движение объекта на любом этапе прыжка: $g_1 = x_1$, $g_2 = y_1$, $g_3 = x_4$, $g_4 = y_4$ — координаты центров масс звеньев 1 и 4 в абсолютной системе; $g_5 = \varphi_1$, $g_6 = \varphi_2$ и $g_7 = \varphi_4$ — углы поворота соответствующих звеньев; $g_8 = l_{23}$ — длина ноги устройства

$$g = (g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ g_5 \ g_6 \ g_7 \ g_8)^T. \quad (6)$$

Система дифференциальных уравнений движения робота в матричной форме имеет вид

$$A_{km}(g)\ddot{g} + B_{km}(g)D(\dot{g})\dot{g} + C_{km}(g)\dot{g}_6\dot{g}_8 = Q_{km}, \quad (7)$$

где $A_{km}(g)$ — матрица коэффициентов при ускорениях; $B_{km}(g)$ — при центробежных силах инерции; $C_{km}(g)$ — при ускорениях Кориолиса; Q_{km} — матрица обобщенных сил. Матрица $D(\dot{g})$ представляет собой диагональную матрицу производных матрицы g .

Этапы прыжка робота

Прыжок устройства начинается из положения, в котором звено 4 робота находится на поверхности, звенья 1, 2 и 3 полностью

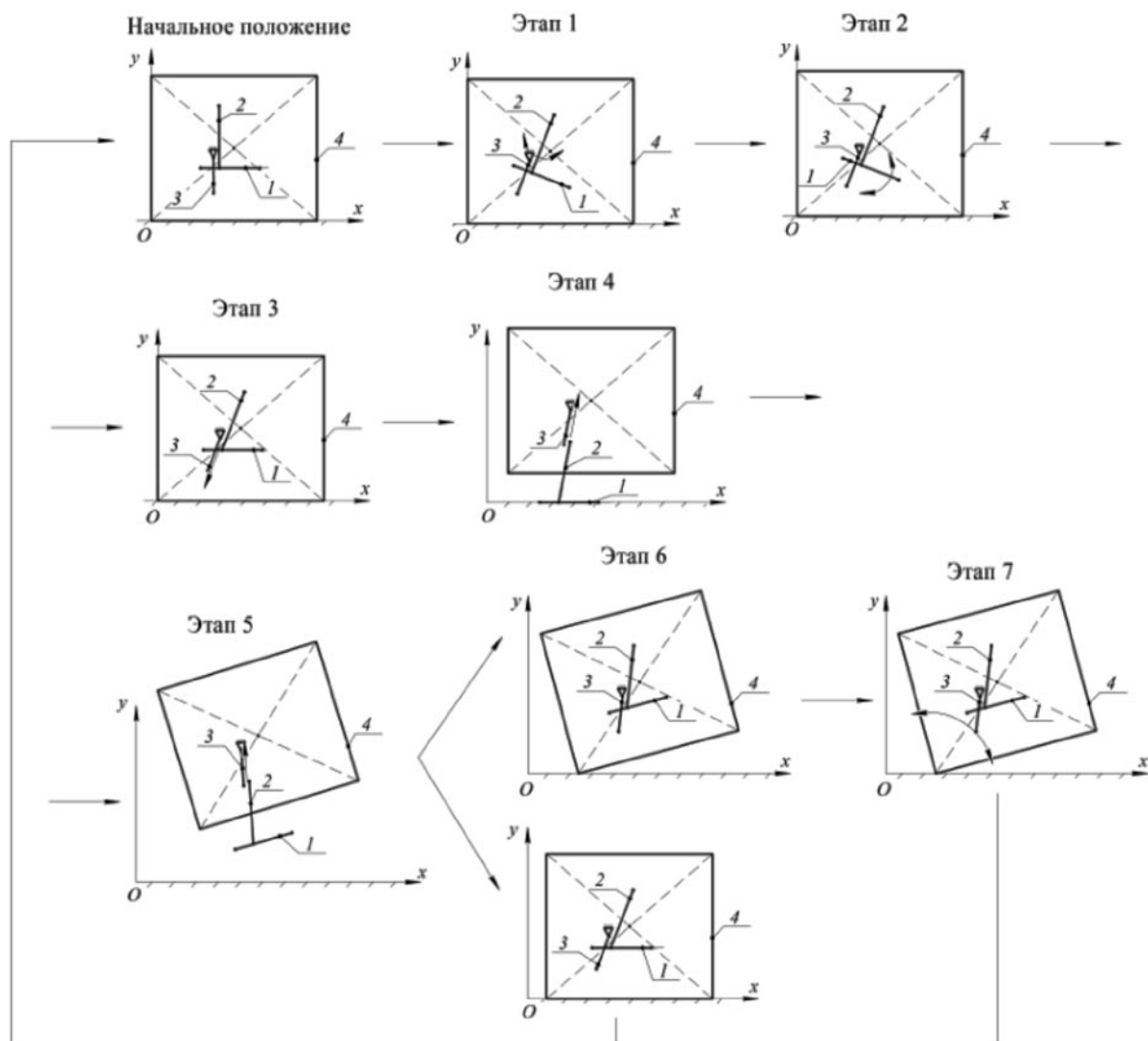


Рис. 2. Этапы прыжка четырехзвенного прыгающего робота

втянуты в корпус — $l_{23} = l_{23}^{\min}$ — и расположены под некоторыми произвольными углами к горизонту $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 = \varphi_2$, и представляет собой последовательность семи этапов $k = 1 \div 7$ (рис. 2).

Этап 1. Звенья 1–3, жестко связанные между собой, поворачиваются относительно точки C_4 за счет момента M_{43} , создаваемого приводом 5, до выполнения условия $\varphi_2 = \varphi_2^0$, где φ_2^0 — угол наклона звеньев 2 и 3 к оси Ox , под которым действует сила, отрывающая робота от поверхности. Обобщенной координатой выступает угол φ_2 :

$$a_{66}^1 \ddot{\varphi}_2 + b_{66}^1 \dot{\varphi}_2^2 = F_{61}^1. \quad (8)$$

Этап 2. Звено 1 поворачивается относительно точки O_2 под действием момента M_{21} , формируемого приводом 6, до тех пор, пока не выполнится условие $\varphi_1 = \varphi_1^0 = \pi$. Дифференциальное уравнение по φ_1 имеет вид

$$a_{55}^2 \ddot{\varphi}_1 = F_{51}^2. \quad (9)$$

Этап 3. Звенья 1 и 2, жестко связанные между собой, перемещаются относительно звена 3 при помощи силы F_{32} , генерируемой приводом 7, до взаимодействия звена 1 с поверхностью, что описывается дифференциальным уравнением

$$a_{88}^3 \ddot{\varphi}_{23} = F_{81}^3. \quad (10)$$



Этап 4. Жестко связанные между собой звенья 3 и 4 перемещаются относительно звена 2 за счет создаваемой приводом 7 силы F_{23} до отрыва звена 1 от поверхности. К концу этого этапа все звенья робота приобретают скорость $\dot{l}_{23}^0$, которая является начальной скоростью этапа полета. В качестве обобщенной координаты выступает l_{23} :

$$a_{88}^4 \ddot{l}_{23} = F_{81}^4. \quad (11)$$

Этап 5. Полет робота, во время которого все звенья движутся с отрывом от поверхности. При этом звенья 1 и 2, связанные между собой, втягиваются в корпус за счет силы F_{32} , формируемой приводом 7, до выполнения условия $l_{23} = l_{23}^{\min}$. Движение робота на данном этапе описывается четырьмя обобщенными координатами:

$$a_{33}^5 \ddot{x}_4 + a_{37}^5 \ddot{\phi}_4 + a_{38}^5 \ddot{l}_{23} + b_{37}^5 \dot{\phi}_4^2 + c_{33}^5 \dot{l}_{23} \dot{\phi}_4 = F_{31}^5, \quad (12)$$

$$a_{44}^5 \ddot{y}_4 + a_{47}^5 \ddot{\phi}_4 + a_{48}^5 \ddot{l}_{23} + b_{47}^5 \dot{\phi}_4^2 + c_{44}^5 \dot{l}_{23} \dot{\phi}_4 = F_{41}^5, \quad (13)$$

$$a_{77}^5 \ddot{\phi}_4 + a_{73}^5 \ddot{x}_4 + a_{74}^5 \ddot{y}_4 + a_{78}^5 \ddot{l}_{23} + b_{77}^5 \dot{\phi}_4^2 + c_{77}^5 \dot{l}_{23} \dot{\phi}_4 = F_{71}^5, \quad (14)$$

$$a_{88}^5 \ddot{l}_{23} + a_{83}^5 \ddot{x}_4 + a_{84}^5 \ddot{y}_4 + a_{87}^5 \ddot{\phi}_4 + b_{87}^5 \dot{\phi}_4^2 = F_{81}^5. \quad (15)$$

Этап 6. Приземление робота на одну или две точки корпуса. В первом случае скорость точки контакта становится равной нулю, а все звенья робота приобретают некоторую угловую скорость ϕ_4^* , после чего прыжок переходит в следующий этап. Во втором случае при приземлении на две точки корпуса их скорости обнуляются, и объект становится неподвижным, прыжок завершается.

Этап 7. Все звенья робота поворачиваются относительно точки контакта до тех пор, пока вторая точка корпуса не начнет взаимодействовать с поверхностью. Дифференциальное уравнение по обобщенной координате ϕ_4 записывается следующим образом:

$$a_{77}^7 \ddot{\phi}_4 + b_{77}^7 \dot{\phi}_4^2 = F_{71}^7. \quad (16)$$

В формулах (7)–(16) использованы обозначения: a_{pn}^k , $p = 1 \div 8$, $n = 1 \div 8$ – коэффициенты при вторых производных обобщенных координат; b_{pn}^k , $p = 1 \div 8$, $n = 1 \div 8$ – коэф-

фициенты при квадратах первых производных обобщенных координат; Q_{pn}^k , $p = 1 \div 8$, $n = 1 \div 8$ – обобщенные силы по обобщенным координатам.

Управляющие моменты и силы

Для исследуемого робота управление параметрами прыжка происходит на этапах позиционирования объекта и его разгона до отрыва от поверхности (этапы 1–4), а также непосредственно во время полета (этап 5). Этапы приземления 6 и 7 неуправляемые. Управляющими воздействиями являются моменты M_{43} , M_{21} , создаваемые приводами 5 и 6, посредством которых соответствующие звенья робота поворачиваются на углы ϕ_2^0 и ϕ_1^0 , и сила F_{32} , формируемая приводом 7, за счет которой звенья 2 и 3 поступательно перемещаются друг относительно друга.

Будем рассматривать указанные величины как кусочно-постоянные функции, численные значения которых на каждом из этапов прыжка являются постоянными. Высота и длина прыжка варьируются за счет изменения временных интервалов t_1 – t_5 этапов 1–5, что позволяет формировать различные значения угла ϕ_2^0 , под которым происходит разгон устройства, скорости $\dot{l}_{23}^0$ отрыва объекта от поверхности, а также скорости и ускорения относительного перемещения звеньев 2 и 3 во время полета.

Моделирование движения робота

В соответствии с последовательностью этапов движения прыгающего робота на геометрические размеры звеньев наложены следующие ограничения:

$$l_{23}^{\min} + l_1 \leq b, \quad l_{23}^{\min} + l_1 \leq a, \quad l_2 \leq b, \quad (17)$$

$$l_2 \leq a, \quad l_3 \leq b, \quad l_3 \leq a, \quad l_{23}^0 > \frac{b}{\sin \phi_2^0}.$$

При численном моделировании прыжка устройства использовался переход к безразмерным параметрам при помощи масштабных коэффициентов $M = 0,05$ кг, $T = 0,1$ с, $L = 0,1$ м. Объектом моделирования является прыгающий робот, обладающий следующими массогабаритными параметрами:

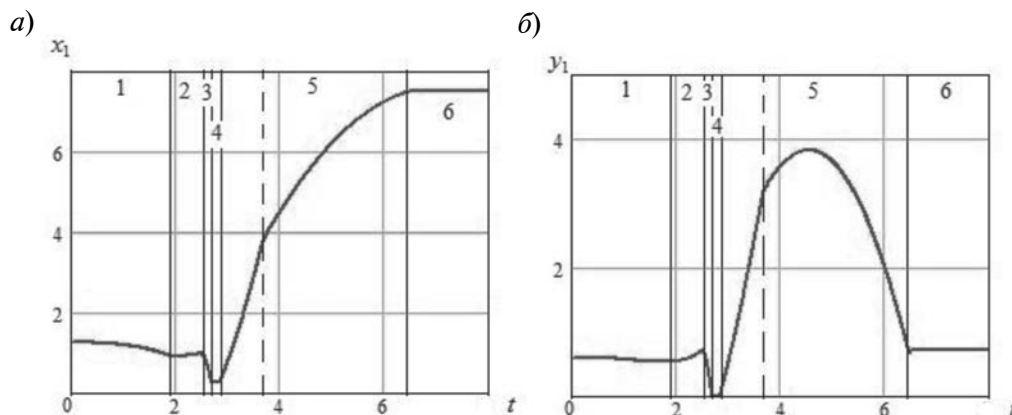


Рис. 3. Графики зависимостей: а – $x_1(t)$; б – $y_1(t)$

$m_1 = 1, m_2 = 1, m_3 = 1, m_4 = 7, a = 1, b = 1, l_1 = 0,5, l_2 = 0,9, l_3 = 0,9, l_{23}^{\min} = 0,4, l_{23}^0 = 1,8, l_4 = 0, l_{23}^0 = 4, \varphi_2^0 = \pi / 4$. Моделирование проводится при начальных условиях: $t = 0, x_4 = a, \dot{x}_4 = 0, y_4 = b, \dot{y}_4 = 0, \varphi_4 = 0, \dot{\varphi}_4 = 0, \varphi_1 = \pi, \dot{\varphi}_1 = 0, \varphi_2 = \pi / 2, \dot{\varphi}_2 = 0$.

На рис. 3–6 приведены временные зависимости координат, посредством которых описывается движение прыгающего робота, а также показаны этапы одного прыжка. По данным графикам видно, что моделируемое движение робота соответствует разработанной и описанной последовательности этапов.

На первых трех этапах, во время которых происходит позиционирование робота, центр масс корпуса неподвижен ($x_4 = \text{const}, y_4 = \text{const}, \varphi_4 = \text{const}$). Звено 1 на первом этапе поворачивается вместе со звеном 2 ($\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2$) до тех пор, пока не станет спра-

ведливым условие $\varphi_2 = \varphi_2^0$ (в рассматриваемом случае $\varphi_2^0 = \pi / 4$), что также отражается на временных зависимостях координат центра масс стопы.

Во время второго этапа происходит поворот звена 1 против часовой стрелки до достижения значения $\varphi_1 = \pi$, траектория $y_1(x_1)$ на этом этапе имеет форму дуги окружности.

На третьем этапе наблюдается выдвигание звеньев 1 и 2 до взаимодействия звена 1 с поверхностью, что находит отражение на графиках рис. 3, 5 а, б, причем изменение координат точки C_1 равно $\Delta x_1 = \Delta l_{23} \cos \varphi_2^0, \Delta y_1 = \Delta l_{23} \sin \varphi_2^0$, углы наклона звеньев к оси Ox не меняются. Завершению третьего этапа соответствует выполнение условия $y_1 = 0$, это означает, что звено 1 лежит на поверхности. Изменение величины l_{23} под действием постоянной силы F_{32} происходит

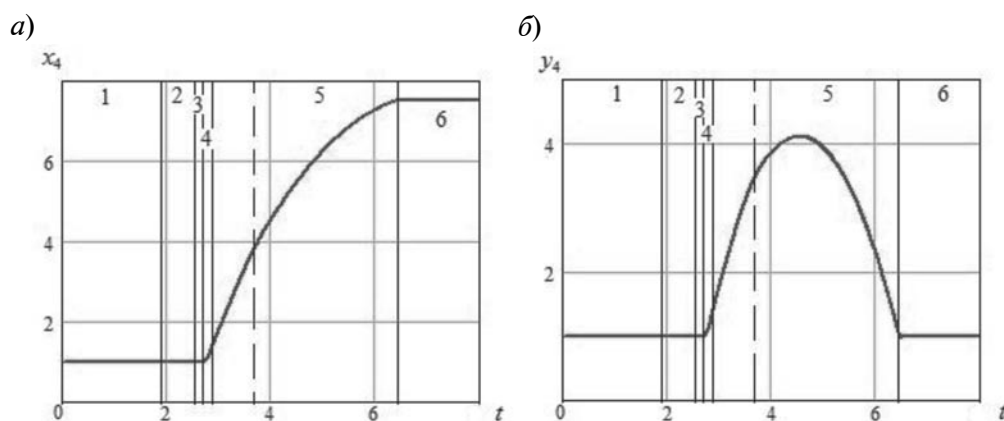


Рис. 4. Графики зависимостей: а – $x_4(t)$; б – $y_4(t)$

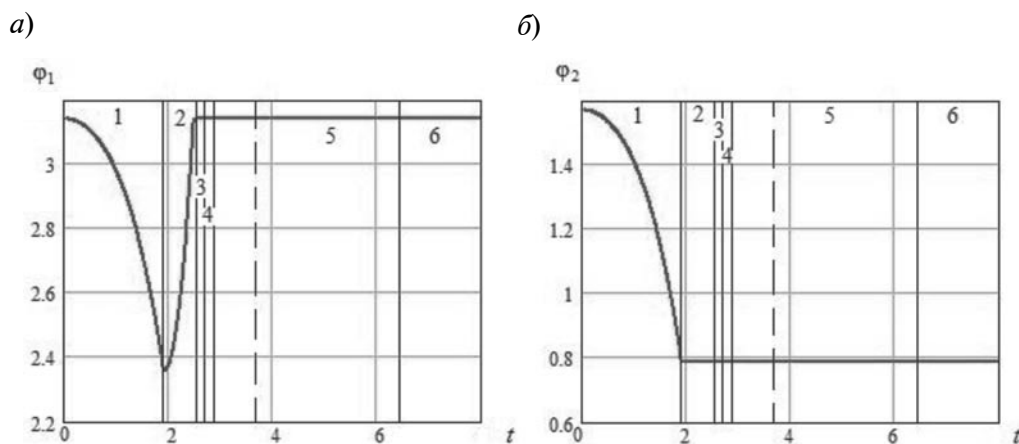


Рис. 5. Графики зависимостей: *a* – $\varphi_1(t)$; *б* – $\varphi_2(t)$

по ветви параболы, что видно по графику рис. 6 *б*, характер изменения x_1 и y_1 аналогичен.

Четвертый этап происходит при взаимодействии звена 1 с поверхностью, что подтверждается графиками рис. 4 ($x_1 = \text{const}$, $y_1 = 0$) и характеризуется перемещением звеньев 3 и 4 относительно звена 2 в положительных направлениях осей Ox и Oy , т. е. увеличением расстояния l_{23} . На этом этапе наблюдается возрастание координат центра масс корпуса, причем справедливы следующие соотношения $\Delta x_4 = \Delta l_{23} \cos \varphi_2^0$, $\Delta y_4 = \Delta l_{23} \sin \varphi_2^0$. Увеличение длины l_{23} происходит под действием постоянной силы F_{23} , значит, характер изменения этой обобщенной координаты так же, как и значений x_4 и y_4 , параболический. Поворота звеньев на данном этапе не происходит, что видно

по графикам рис. 5, 6 *а*.

Пятый этап, во время которого робот движется с отрывом от поверхности, характеризуется изменением координат центров масс всех звеньев робота, а также вытягиванием звеньев 1 и 2 в корпус. В моделируемом прыжке линии действия разгоняющей силы и силы, посредством которой звенья 1 и 2 вытягиваются в корпус, проходят через центр масс последнего, поэтому вращения корпуса относительно его центра масс в полете не происходит, что находит отражение на графике рис. 6 *б*. Звенья 1 и 2 перемещаются относительно корпуса до тех пор, пока значение l_{23} не станет равным начальному ($l_{23} = l_{23}^{\min}$). Это наблюдается до момента времени, отмеченного на всех графиках пунктирной линией. На данном участке пятого этапа (до пунктир-

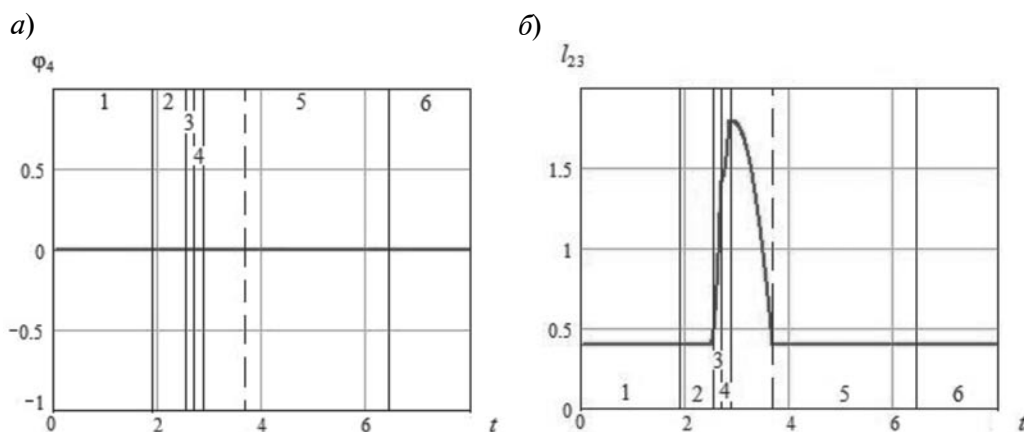


Рис. 6. Графики зависимостей: *a* – $\varphi_4(t)$; *б* – $l_{23}(t)$

ной линии) изменения координат центров масс звеньев 1 и 4 различны и $\Delta x_1 > \Delta x_4$, $\Delta y_1 > \Delta y_4$, т. к. скорость звена 1 больше скорости звена 4 и в проекциях на оси Ox и Oy равна $\dot{x}_1 = \dot{x}_4 + \dot{l}_{23} \cos \varphi_2$, $\dot{y}_1 = \dot{y}_4 + \dot{l}_{23} \sin \varphi_2$. После того как втягивание ноги завершится, все звенья робота будут двигаться с одинаковыми скоростями и ускорениями, поэтому изменения координат точек C_1 и C_4 будут равными: $\Delta x_1 = \Delta x_4$, $\Delta y_1 = \Delta y_4$. На графиках $x_1(t)$, $y_1(t)$ в момент времени, когда прекращается втягивание ноги, виден излом, до которого подъем графиков более крутой, а после — более пологий, что подтверждает правильность моделирования.

Движение робота переходит в шестой этап, когда одна или две точки корпуса начнут взаимодействовать с опорной поверхностью. В связи с тем что в рассматриваемом случае поворота корпуса робота в полете не происходит, приземление будет осуществляться на те же точки корпуса, с каких начинался первый этап прыжка, т. е. на точки A_1 и A_4 . На графике $y_4(t)$ видно, что в момент начала этапа 6 значение ординаты центра масс корпуса равно значению y_4 в момент начала прыжка, это означает что точки A_1 и A_4 лежат на поверхности. Изменения координат центров масс звеньев 1 и

4 во время этого этапа не наблюдается, т. к. в соответствии с принятой моделью трения скорости точек контакта с поверхностью равны нулю. Углы поворота звеньев также остаются постоянными.

Анализ представленных в работе графиков свидетельствует о правильности разработанных алгоритма и программы моделирования прыжка робота, что подтверждается соответствием характера изменения координат вектора g описанной последовательности этапов движения устройства.

В статье рассмотрен прыгающий робот, один прыжок которого представлен в виде последовательности восьми этапов. Разработана математическая модель поэтапного движения робота, условия перехода из одного этапа в другой, а также связи, наложенные на движения звеньев робота на каждом из этапов.

В соответствии с данной математической моделью проведено численное моделирование прыжка робота, результаты которого позволяют подтвердить правильность разработанной программы и проследить последовательность этапов движения на временных зависимостях характеристик робота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zufferey, J.-C. First Jumps of the 3D Bow Leg Hopper [Text] / J.-C. Zufferey // Micro-engineering, EPFL. — 2001. — 65 p.
2. Ishikawa, A. Energy preserving control of a hopping robot based on hybrid port-controlled hamiltonian modelling [Text] / A. Ishikawa, M. Neki, J. Hara // IEEE Conf. on Control Applications. — Yokohama, Japan, 2003. — Vol. 2. — P. 1136–1141.
3. Zeglin, G. Uniroo: A One-Legged Dynamic Hopping Robot [Text] / G. Zeglin. — Massachusetts Institute of Technology, 1991. — 65 p.
4. Sato, A. A Planar Hopping Robot with One Actuator: Design, Simulation, and Experimental Results [Text] / A. Sato. — Department of Mechanical Engineering, Montreal, Canada, 2004. — 106 p.
5. Kovac, M. A miniature 7g jumping robot [Text] / M. Kovac, M. Fuchs, A. Guignard // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation. — Pasadena, 2008. — P. 373–378.
6. Волкова, Л.Ю. Исследование движения многосвязного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности [Текст] / Л.Ю. Волкова, В.В. Серебровский, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного гос. ун-та. — 2012. — № 1(40). — Ч. 2. — С. 12–18.
7. Яцун, С.Ф. Исследование динамики управляемого прыжка робота [Текст] / С.Ф. Яцун, А.Н. Рукавицын, Л.Ю. Волкова // Известия Самарского науч. центра РАН. — 2012. — Т. 14. — № 4(5). — С. 1355–1358.
8. Яцун, С.Ф. Управление высотой и длиной прыжка робота путем его позиционирования и разгона [Текст] / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова // Известия Юго-Западного гос. ун-та. Техника и технологии. — 2012. — № 2. — Ч. 1. — С. 210–213.
9. Яцун, С.Ф. Исследование влияния закона втягивания ноги в полете на высоту и длину прыжка многосвязного робота [Текст] / С.Ф. Яцун, Л.Ю. Волкова // Mater. IX Mezinárodní vědecko-praktická conf. Moderní vymoženosti vědy — 2013. — Praha. — С. 77–81.
10. Лушников, Б.В. Компьютерное моделирование динамики элемента сухого некулонова трения [Текст] / Б.В. Лушников // Известия



Самарского науч. центра РАН. – 2010. – Т. 12. – № 1(2). – С.439–444.

11. **Лушников, Б.В.** Испытательный стенд для идентификации динамических параметров сухого некулонова трения [Текст] / Б.В. Лушников // *Фундаментальные исследования*. – 2012.

– № 3. – Ч. 3. – С. 238–241.

12. **Болотник, Н.Н.** Динамика управляемых движений вибрационных систем [Текст] / Н.Н. Болотник, И.М. Зейдис, К. Циммерман, С.Ф. Яцун // *Известия РАН ТиСУ*. – 2006. – № 5. – С. 157–167.

REFERENCES

1. **Zufferey J.-C.** First Jumps of the 3D Bow Leg Hopper / *Micro-engineering, EPFL*. – 2001. – 65 p.

2. **Ishikawa A., Neki M., Hara J.** Energy preserving control of a hopping robot based on hybrid port-controlled hamiltonian modelling / *IEEE Conf. on Control Applications*. – Yokohama, Japan, 2003. – Vol. 2. – P. 1136–1141.

3. **Zeglin G.** Uniroo: A One-Legged Dynamic Hopping Robot. – Massachusetts Institute of Technology, 1991. – 65 p.

4. **Sato A.** A Planar Hopping Robot with One Actuator: Design, Simulation, and Experimental Results. – Department of Mechanical Engineering, Montreal, Canada, 2004. – 106 p.

5. **Kovac M., Fuchs M., Guignard A.** A miniature 7g jumping / *Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation*. – Pasadena, 2008. – P. 373–378.

6. **Volkova L.Yu., Serebrovsky V.V., Jatsun S.F.** Issledovanie dvizheniya mnogozvennogo robota, peremeschayushegosya s otrivom ot poverhnosti [Research of movement of the multilink robot moving with a jump from a surface] // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gos. un-ta*. – 2012. – № 1 (40). – Ch. 2. – S. 12–18. (rus)

7. **Jatsun S.F., Rukavitsyn A.N., Volkova L.Yu.** Issledovanie dinamiki upravlyаемого прыzhka robota [Research of dynamics of operated jump of the robot] / *Izvestiya Samarskogo nauch. tsentra RAN*. – 2012. – Т. 14. – № 4 (5). – S. 1355–1358. (rus)

8. **Jatsun S.F., Volkova L.Yu.** Upravlenie vyisotoy i dlinoy pryzhka robota putem ego pozitsionirovaniya i razgona [Control of high and length of the jump by its positioning and lift-off] / *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gos. un-ta*. – 2012. – № 2. – Ch. 1. – S. 210–213. (rus)

9. **Jatsun S.F., Volkova L.Yu.** Issledovanie vliyaniya zakona vtyagivaniya nogi v polete na vyisotu i dlinu pryzhka mnogozvennogo robota [Investigation of the influence of the law of the retraction of leg on high and length of the jump of the multilink jumping robot] / *Mater. IX Mezinárodní vědecko-praktická conf. Moderní vymoženosti vědy* – 2013. – Praha. – P. 77–81.

10. **Lushnikov B.V.** Kompyuternoe modelirovanie dinamiki elementa suhogo nekulonova treniya [Computer modelling of the dynamics of the element of dry no-Coulomb friction] / *Izvestiya Samarskogo nauch. tsentra RAN*. – 2010. – Т. 12. – № 1(2). – S. 439–444. (rus)

11. **Lushnikov B.V.** Ispytatelnyy stand dlya identifikatsii dinamicheskikh parametrov suhogo nekulonova treniya [Test bench for identification of the dynamic parameters of dry no-Coulomb friction] / *Fundamentalnyie issledovaniya*. – 2012. – № 3. – Ч. 3. – S. 238–241. (rus)

12. **Bolotnik N.N., Zeidis I.M., Zimmerman K. et. al.** Dinamika upravlyаемых dvizheniy vibratsionnykh sistem [Dynamics of operated movements of vibration systems] / *Izvestiya RAN TiSU*. – 2006. – № 5. – S. 157–167. (rus)

ЯЦУН Сергей Федорович – *заведующий кафедрой теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета, доктор технических наук, профессор.*

305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

E-mail: teormeh@inbox.ru

JATSUN, Sergey F. *South-West State University.*

305040, 50 let Oktyabry Str. 94, Kursk, Russia.

E-mail: teormeh@inbox.ru

ЛОКТИОНОВА Оксана Геннадьевна – *проректор по учебной работе Юго-Западного государственного университета, доктор технических наук, профессор.*

305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

E-mail: teormeh@inbox.ru

LOKTIONOVA, Oksana G. *South-West State University.*
305040, 50 let Oktyabry Str. 94, Kursk, Russia.
E-mail: teormeh@inbox.ru

ВОЛКОВА Людмила Юрьевна — аспирант Юго-Западного государственного университета.
305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.
E-mail: mila180888@yandex.ru

VOLKOVA, Lyudmila Yu. *South-West State University.*
305040, 50 let Oktyabry Str. 94, Kursk, Russia.
E-mail: mila180888@yandex.ru

ВОРОЧАЕВ Александр Валерьевич — студент Юго-Западного государственного университета.
305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.
E-mail: teormeh@inbox.ru

VOROCHAEV, Alexander V. *South-West State University.*
305040, 50 let Oktyabry Str. 94, Kursk, Russia.
E-mail: teormeh@inbox.ru



УДК 004.896:004.5:621.865.8-5

О.А. Голубева, А.С. Ильин, И.Б. Прямыцын, О.А. Шмаков

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ РОБОТА

О.А. Golubeva, A.S. Il'yin, I.B. Pryamitsyn, O.A. Shmakov

FEATURES OF PROGRAMMING OF MANAGEMENT OF LINEAR MOVEMENTS OF THE ROBOT

Для линейного перемещения роботов различного назначения, подвешиваемых на тросах (кабелях) или установленных на подвесную рельсу или на наземные рельсы, предложен интерфейс, обеспечивающий удобные возможности управления. Пользователю предоставлены три шкалы регулируемого масштаба, таблица требуемых (запомненных) позиций, кнопки указания скорости и направления, селектор величины шага. Перечисленные возможности описаны и предложены в качестве унифицированных и эргономичных.

РОБОТ. ЛИНЕЙНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ. ИНТЕРФЕЙС. УНИФИКАЦИЯ.

For linear movement of the robots of different function suspended on cables or installed on suspended to a rail or on land rails, the interface providing convenient possibilities of control is offered. Three scales of adjustable scale, the table of the demanded (remembered) positions, buttons of the indication of speed and the direction, the selector of size of a step are provided to the user. The listed opportunities are described and offered as unified and ergonomic.

ROBOT. LINEAR MOVEMENTS. INTERFACE. UNIFICATION.

В настоящее время, когда все более широкое применение получают портативные видеокамеры, транслирующие изображение на центральный пост, когда для обеспечения точности позиционирования видеокамер в комплекте с другой робототехнической аппаратурой требуемого назначения все более широко применяются прецизионные электроприводы или лазерные дальномеры, когда средства индикации и управления (в т. ч. ноутбуки), обладающие широкими возможностями, стали применимыми для использования в неблагоприятных условиях, — для программирования интерфейса также имеется широкий простор для творчества в решении требуемых задач управления перемещениями.

Например, на сайте [1] представлен каталог электроприводов фирм Maxon Motor (Швейцария), Harmonic Drive (Германия), Ever Elettronica (Италия) и др. На сайте [2] представлен каталог лазерных даль-

меров, при этом указано наличие модуля беспроводной связи Bluetooth. Лазерный дальномер с такой функцией позволяет передавать данные измерений на компьютер для дальнейших расчетов. На сайте [3] представлен ноутбук General Dynamics Itronix GD8000 для экстремальных условий эксплуатации.

Самовыражение (самореализация) человека в техническом творчестве всегда существует и стимулируется [4, с. 46–47], а программисты в этом аспекте наиболее свободны. Разнообразие задач также порождает разнообразие средств, предоставляемых пользователям.

Как известно [5], основная функция пользовательского интерфейса — обеспечение оптимального информационного взаимодействия между человеком и компьютером. При этом проектирование интерфейса не сводится к простой компоновке элементов экранных форм по предписанным

рецептам. В решении поставленной задачи необходимо тщательно прорабатывать каждую мелочь прежде всего с точки зрения пользователя. Поэтому разработчики программного обеспечения всегда учитывают мнения и пожелания не только заказчиков, но и пользователей всех рангов.

Разработчики интерфейсов должны руководствоваться методологией, которая имеет статус особой науки, называемой *эргономика* [6].

При этом весьма важно, чтобы для решения однотипных задач был выработан единый стиль, позволяющий пользователю во всех случаях работать без необходимости существенно перестраивать свои привычки и навыки.

Недооценка эргономических факторов может привести не только к снижению эффективности человеко-машинной системы, но и к снижению ее безопасности.

Например, в авиации индикация углов тангажа и крена имеет два стиля («вид с земли на воздушное судно» и «вид с воздушного судна на землю»). Это порождает для летчиков серьезные трудности, чреватые катастрофическими последствиями [7].

Как видно, например, из [8, с. 104, рис. 3.8], несмотря на несомненную необходимость повышения уровня интеллекта роботов, приоритетный уровень управления всегда останется за человеком-оператором.

Поэтому для управления роботами целесообразно выделить класс задач «линейные перемещения», для этого класса сформировать унифицированный интерфейс.

Линейные перемещения могут быть горизонтальными (по подвесной рельсе или по наземным рельсам) или вертикальными (на тросе или кабеле, — вдоль высотных зданий и сооружений, в шахты, в глубину морских вод).

В любом из этих случаев характерно, что пользователь имеет необходимость чередовать задания разной степени точности, в разных масштабах.

Первоначально пользователь обычно желает дать задание приближенного характера: двигаться в заданном направлении, чтобы выполнить поиск объекта или

приблизиться к интересующему объекту, или найти удобный ракурс наблюдения, или чтобы выполнить замеры уровня радиации.

Сенсорные системы соответствующего назначения описаны, например, в книге [9]: в разделе 2.3 — для измерения радиации, в главе 3 — системы технического зрения.

Величина требуемого перемещения может быть указана, например, 30 м, и при этом программа управления выполнит перемещение в точности 30 000 мм. Например, в [9] в разделе 2.1 указано, что использование лазерного локатора SICK (Германия) обеспечивает точность 10 мм.

Но обычно первоначально не требуется миллиметровая точность. Пользователю важнее, чтобы посредством минимального количества нажатий кнопок (клавиш) или кликов указать лишь приближенную требуемую позицию относительно сделанных отметок на шкале выбранного масштаба.

По мере приближения к интересующему объекту пользователь обычно желает уточнить задание: снизить скорость и остановиться, а затем короткими шагами корректировать позицию. И в этом случае указывать величину требуемого шага требуется обычно лишь приближенно, но в более детальном масштабе.

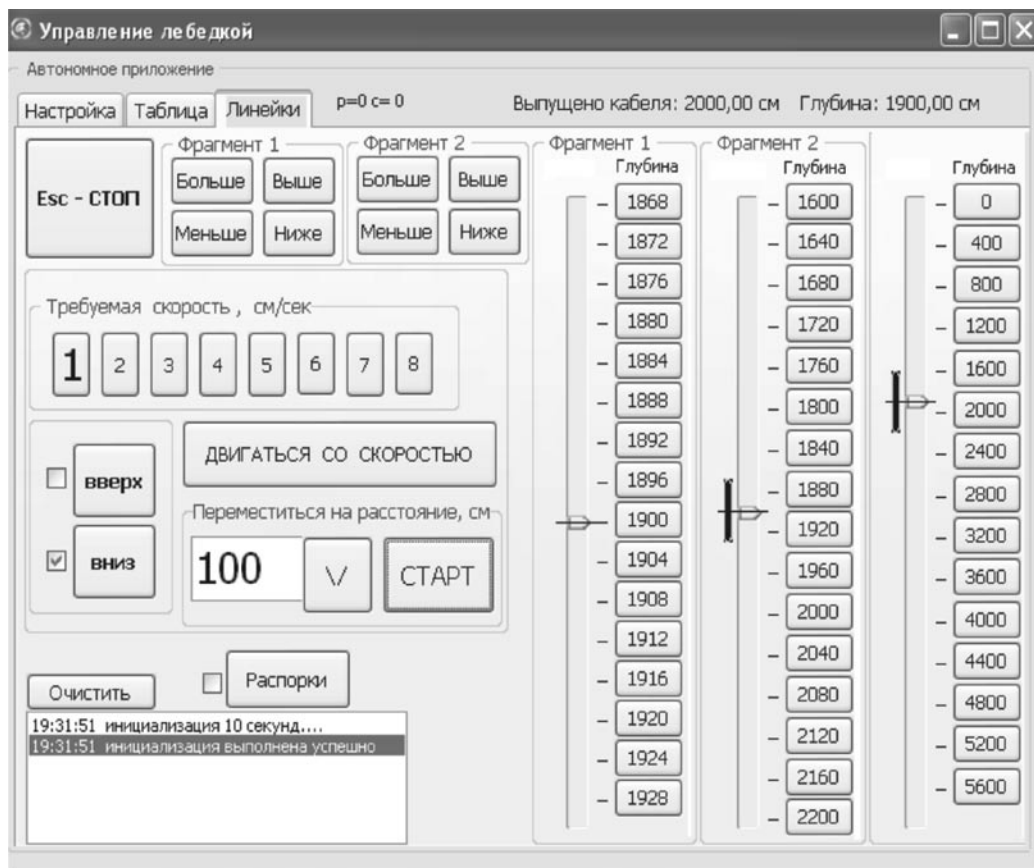
Выполнив позиционирование, пользователь обычно желает сохранить позицию в сортированной таблице, чтобы в дальнейшем, ограничиваясь указанием запомненной позиции, давать задание возвратиться в точности на ту же линейную координату.

К каждой запомненной позиции может потребоваться отдельный комментарий. Для ввода комментария удобно применять заготовленные шаблоны.

В этой же таблице могут содержаться планируемые или вычисленные позиции.

Перемещаемый робот обычно находится вне поля зрения пользователя. Контролирование положения робота происходит только средствами интерфейса.

В соответствии с перечисленными требованиями предлагается использовать три шкалы регулируемого масштаба, а также ряд других элементов интерфейса, представленных на рисунке.



Интерфейс управления лебедкой

Для вертикальных перемещений каждая вертикальная шкала имеет цифровые координатные отметки справа от шкалы, а указатель позиции имеет вид узкой горизонтальной полоски, которая пересекает не только эту основную шкалу, но и вертикальную полоску, находящуюся левее, указывающую размеры и положение соседней шкалы более детального масштаба, если она есть.

Этот образ соседней шкалы имеет противоположный цвет по сравнению с цветом шкалы.

Соседняя шкала более детального масштаба расположена с той же стороны, как и ее образ. Таким образом, крайняя левая шкала является наиболее детальной, а крайняя правая — наиболее общей.

Аналогично для горизонтальных перемещений среди трех горизонтальных шкал нижняя шкала является наиболее детальной, верхняя — наиболее общей.

Для каждой шкалы, кроме общей, имеется группа кнопок регулирования ее размеров и положения. Кнопками «Выше» и «Ниже» можно смещать шкалу на расстояние, равное 0,3 диапазона шкалы. Этот коэффициент обозначим K — коэффициент трансформации, он должен быть регулируемым. При нажатии кнопок «Больше» и «Меньше» происходит увеличение/уменьшение размера диапазона шкалы в $1 + K$ раз, но не меньше удвоенного размера левой шкалы и не больше половины размера правой шкалы. При изменении масштаба шкалы пропорция расстояний от текущего положения до границ шкалы сохраняется неизменной. Но при этом также действует контроль, чтобы границы изменяемой шкалы не вышли за границы более общей шкалы.

Указанный коэффициент трансформации выбирается из тех соображений, чтобы пользователь мог настроить шкалу так, что-

бы видеть требуемую область (группу меток) в наиболее детальном масштабе. Заменяя этот коэффициент, можно достичь более близкого размещения границ требуемой области к границам шкалы, но при этом от пользователя потребуются большее количество нажатий указанных кнопок регулирования. Пользователю не обременительно нажимать одни и те же кнопки несколько раз, только если при этом наблюдается меняющийся результат, вскоре приближающийся к желаемому.

В тот момент, когда робот достигает положения, соответствующего какой-либо границе шкалы, происходит автоматическая перенастройка границ так, чтобы текущее положение робота было на расстоянии $1 - K$ размера диапазона шкалы до той границы, в сторону которой движется робот. Этот параметр выбран из двух соображений противоположного характера:

чтобы смена границ диапазона шкалы мелькала не столь часто;

чтобы при новых границах положение робота было в поле зрения пользователя.

В состоянии, когда робот остановлен, пользователю предоставлена возможность с помощью мыши переместить указатель текущего положения, тем самым указывая требуемое положение.

Метки для шкал представлены в виде кнопок, нажатие которых означает старт на соответствующую позицию. Эта возможность доступна и во время движения робота.

Чем чаще размещены эти координатные кнопки, тем удобнее пользователю манипулировать роботом. Поэтому в соответствии с размером кнопки для автоматически вычисляемой цены деления применяется ближайшее минимально возможное округленное значение из набора (1, 2, 3, 4, 5, 10), а не только из набора (1, 5, 10), который рекомендован в [10]. С помощью переключателя предоставлена возможность выбрать индикацию абсолютных значений координат (от исходного положения робота) или относительных значений (от текущего положения) на кнопках вдоль шкалы.

Запомненные позиции также могут быть представлены в виде кнопок слева от каждой шкалы. Поэтому комментарии к пози-

циям рекомендуется применять не слишком длинные, применимые в качестве названий кнопок. Если сформированные кнопки у шкалы оказываются перекрывающимися, то верхней должна быть кнопка, координата которой записана в таблицу позже других координат. Трудность выбора перекрытой кнопки можно обойти, если переход к запомненной позиции выполнить путем выбора соответствующей строки таблицы с дальнейшим нажатием клавиши «Enter» или кнопки «На позицию».

Селектор скорости представлен в виде набора кнопок. Последняя нажатая кнопка (выбранная скорость) помечается крупным шрифтом цифры на кнопке. Пока робот остановлен, нажатие на кнопку скорости ни на что не влияет. После нажатия кнопки «Старт» или кнопки перехода к заданной позиции происходит ускорение до выбранной скорости. В ходе движения нажатие на кнопку другого значения скорости незамедлительно приводит к ускорению/замедлению до новой указанной скорости.

При выполнении операции перехода на заданную позицию селектор направления движения не играет роли, его состояние остается неизменным.

При движении робота заданная целевая позиция отличается от текущей позиции, выделена красным цветом.

Но если пользователь запустил движение в заданном направлении с заданной скоростью без указания целевой позиции, то должны действовать определенные априорные ограничения. А также уместно сделать пользователю напоминание о необходимости вовремя нажать кнопку «Стоп»: перевести название этой кнопки в режим мерцания.

Таким образом, в классе задач «линейные перемещения» пользователю предоставлена возможность наглядно получать полную информацию о текущем положении перемещаемого робота и управлять его движением с понятной необходимостью нажатия кнопок. Такого вида интерфейс предлагается использовать унифицированно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.aviton.spb.ru/catalog/elektroprivodyi/producers/>
2. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.rusgeocom.ru/catalog/lazernye-dalnomeryi/>
3. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.morepc.ru/notebook/news.html?uin=not190320091>
4. **Юревич, Е.И.** Основы проектирования техники: Учеб. пособие [Текст] / Е.И. Юревич. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 148 с.
5. **Обознов, А.А.** Экспериментальный метод в проектировании пользовательских интерфейсов [Текст] / А.А. Обознов // Экспериментальная психология в России: Традиции и перспективы; Под ред. В.А. Барабанщикова. — М.: Изд-во Ин-та психологии РАН, 2010. — С 528–530.
6. **Баканов, А.С.** Проектирование пользовательского интерфейса: эргономический подход [Текст] / А.С. Баканов, А.А. Обознов. — М.: Изд-во Ин-та психологии РАН, 2009. — 184 с.
7. **Григорьев, И.И.** Драматическая индикация углов крена и тангажа на летательных аппаратах [Электронный ресурс] / И.И. Григорьев // Вестник МНАПЧАК. — 2010. — №3 (34). — Режим доступа: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-38585.html?page=5>
8. **Станкевич, Л.А.** Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике [Текст] / Л.А. Станкевич, Е.И. Юревич. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 167 с.
9. **Юревич, Е.И.** Сенсорные системы в робототехнике: Учеб. пособие [Текст] / Е.И. Юревич. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 100 с.
10. **Мунипов, В.М.** Эргономика: человеко-ориентированное проектирование техники, программных средств и среды: Учебник [Текст] / В.М. Мунипов, В.П. Зинченко. — М.: Логос, 2001. — 356 с.

REFERENCES

1. Available <http://www.aviton.spb.ru/catalog/elektroprivodyi/producers/>
2. Available <http://www.rusgeocom.ru/catalog/lazernye-dalnomeryi/>
3. Available <http://www.morepc.ru/notebook/news.html?uin=not190320091>
4. **Yurevich E.I.** Osnovy proektirovaniya tehniki: Ucheb. posobie. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. — 148 s. (rus)
5. **Oboznov A.A.** Eksperimentalnyi metod v proektirovanii polzovatel'skikh interfeysov / Eksperimental'naya psikhologiya v Rossii: Traditsii i perspektivy; Pod red. V.A. Barabanshikova. — Moscow: Izd-vo In-ta psikhologii RAN, 2010. — S. 528–530. (rus)
6. **Bakanov A.S., Oboznov A.A.** Proektirovanie polzovatel'skogo interfeysa: ergonomecheskiy podhod. — Moscow: Izd-vo In-ta psikhologii RAN, 2009. — 184 s. (rus)
7. **Grigorev I.I.** Dramaticheskaya indikatsiya uglov krena i tangazha na letatelnykh apparatah / Vestnik MNAPChAK. — 2010. — № 3 (34). (rus) Available <http://rudocs.exdat.com/docs/index-38585.html?page=5>
8. **Stankevich L.A., Yurevich E.I.** Iskusstvennyi intellekt i iskusstvennyi razum v robototekhnike. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. — 167 s. (rus)
9. **Yurevich E.I.** Sensornye sistemy v robototekhnike: Ucheb. posobie. — St-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. — 100 s. (rus)
10. **Munipov V.M., Zinchenko V.P.** Ergonomika: chelovekoorientirovannoe proektirovanie tehniki, programmnykh sredstv i sredy: Uchebnik. — Moscow: Logos, 2001. — 356 s. (rus)

ГОЛУБЕВА Ольга Алексеевна — ученый секретарь Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики, кандидат технических наук.

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.

E-mail: ogolubeva@rtc.ru

GOLUBEVA, Olga A. Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.

194064, Tikhoretsky pr. 21, St.-Petersburg, Russia.

E-mail: ogolubeva@rtc.ru

ИЛЬИН Анатолий Степанович — старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики, кандидат технических наук.

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.

E-mail: toly@rtc.ru

IL'YIN, Anatoliy S. *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky pr. 21, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: toly@rtc.ru

ПРЯМИЦЫН Игорь Борисович — заместитель начальника отдела Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики.

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.
E-mail: pib@rtc.ru

PRYAMITSYN, Igor B. *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky pr. 21, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: pib@rtc.ru

ШМАКОВ Олег Александрович — начальник отдела Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики.

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.
E-mail: shmakov@rtc.ru

SHMAKOV, Oleg A. *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky pr. 21, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: shmakov@rtc.ru



УДК 004.896:535.8

А.В. Нгуен, Б.Б. Михайлов

СПОСОБ РАСПОЗНАВАНИЯ МНОГОГРАННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

A.V. Nguyen, B.B. Mikhailov

THE METHOD OF MULTIFACETED SPATIAL OBJECTS RECOGNIZING

Рассмотрен вариант описания трехмерных объектов для робототехнических задач. Предложен способ распознавания многогранных пространственных объектов и выполнена оценка его работоспособности на реальных сценах.

СТЕРЕОЗРЕНИЕ. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ. МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ.

The paper presents the way of three-dimensional objects description for robotics tasks. The method of multifaceted spatial objects recognizing is proposed, and evaluation of its performance on real scenes is completed.

STEREOVISION. COMPUTER VISION. MOBILE ROBOT.

В настоящее время актуальна проблема создания интеллектуальных роботов. Поскольку роботы должны работать в реальных условиях, возникает задача распознавания объемных объектов. В данной статье рассматривается использование 3D системы технического зрения для распознавания многогранных объектов. На выходе системы зрения формируется трехмерный массив координат точек рабочего пространства. Описываются методы обработки 3D массива координат точек для распознавания пространственных объектов.

Способ распознавания. Способ распознавания зависит от конкретной задачи, типа данных и требований к результатам распознавания. В настоящей статье рассматриваются только многогранные объекты, имеющие свои особенные точки — точки соединения нескольких плоскостей, которые инвариантны к расположению объектов в пространстве. Рассматриваемый ниже метод использует процедуру совмещения характерных точек реальных объектов с их пространственными моделями. На рис. 1 показаны основные этапы распознавания многогранных трехмерных объектов.

Методы обработки 3D массива координат. С помощью 3D телекамеры получаем массив точек рабочей сцены со своими координатами и число треугольников, которые составляются из трех соседних точек [1, 5, 7]. После этого легко можно определить нормальные векторы каждого треугольника. Например, на рис. 2 треугольник f_i состоит из трех точек V_i, V_j, V_k и имеет нормальный вектор n_i .

Используя эти данные, составляем для каждого треугольника уравнение плоскости, которое имеет вид

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

или в векторной форме

$$(r, n) + D = 0,$$

где r — радиус-вектор точки (x, y, z) ; $n = (A, B, C)$ — вектор, перпендикулярный к плоскости треугольника.

В процессе фильтрации исходных данных программа считает площадь для каждой отдельной области изображения и сравнивает ее значение с заданным. Если площадь полученной области меньше заданного значения, программа исключает ее из дальнейшего анализа. В результате процедуры остаются только те точки, которые

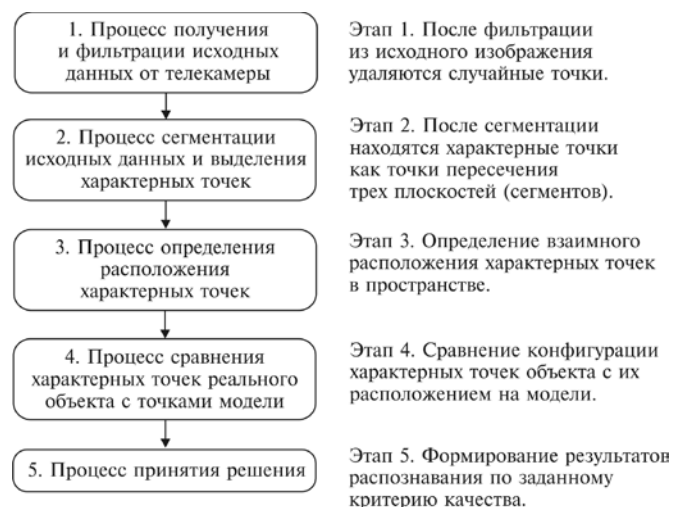


Рис. 1. Этапы распознавания многогранных трехмерных объектов

расположены на плоскостях, ограничивающих объекты сцены.

Процесс сегментации и методы поиска характерных точек. Используя параметры треугольников (координаты вершин, площадь и значение нормали), можно выполнить сегментацию изображения. Ниже рассмотрены три способа решения этой задачи [2, 8, 9].

1. Использование направляющих косинусов. При этом подходе мы разделяем все треугольники на несколько классов путем анализа значения углов наклона нормальных векторов. В результате использования данного подхода формируется несколько

массивов точек сегментов. Причем каждый сегмент состоит из нескольких независимых областей, имеющих одинаковую ориентацию в рабочем пространстве.

2. Анализ параллельности треугольников. При этом походе анализируется расположение плоскостей треугольников исходного изображения. Все треугольники, имеющие одинаковую ориентацию в рабочем пространстве, относятся к одному классу. В результате получаем набор сегментов. При этом каждый сегмент состоит из нескольких независимых областей, имеющих одинаковую ориентацию в рабочем пространстве.

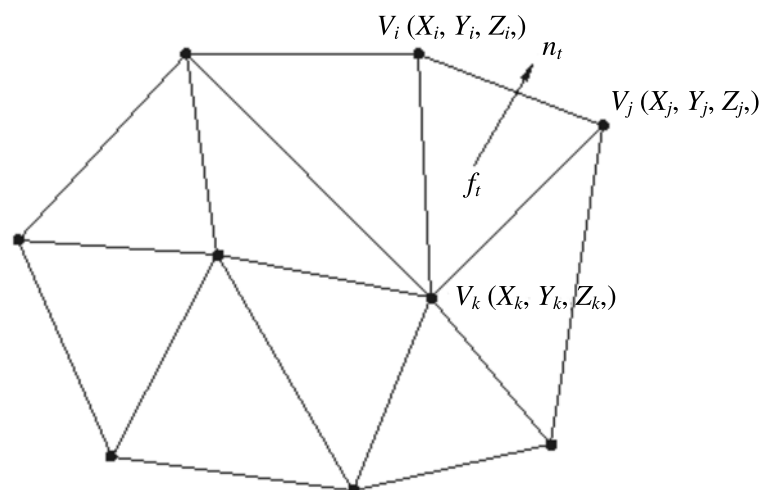


Рис. 2. Пространственный объект, ограниченный плоскостями

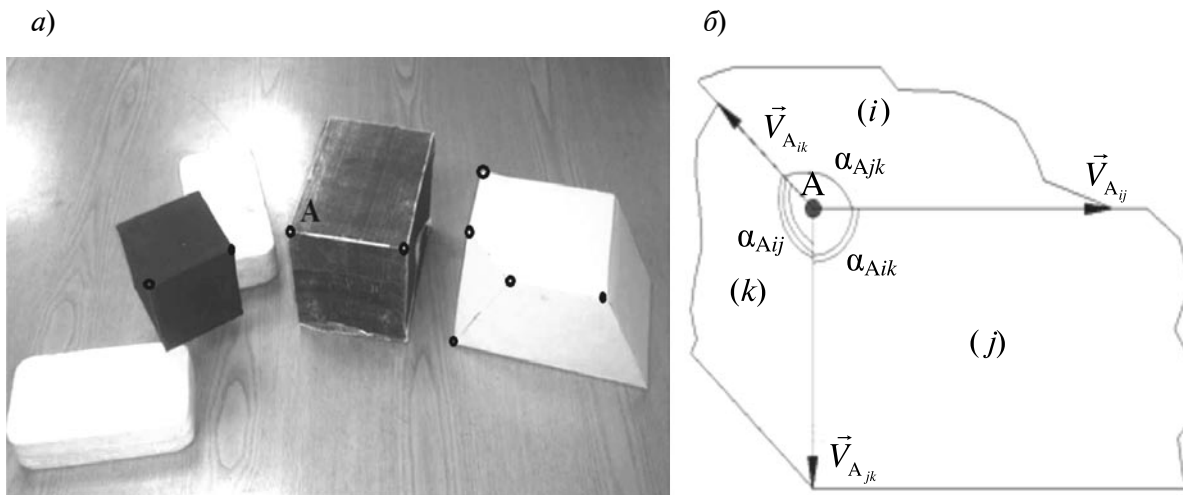


Рис. 3. Определение координат точки А:
а – реальные объекты; б – параметры точки А

3. Последовательный анализ соседних треугольников. В этом способе последовательно проверяются значения углов наклона между нормальными соседних треугольников. Если ошибка между углами наклона меньше заданного порога, то эти треугольники собираются в одном массиве. В результате каждый полученный сегмент состоит из точек только одной независимой области изображения.

Цель процесса сегментации – выделить на изображении локальные однородные области. Поскольку на сцене расположены только многогранные объекты, то можно считать, что каждый сегмент является плоскостью одного объекта.

Метод выделения характеристических точек объектов. В данном случае мы считаем, что особенной точкой является точка пересечения трех плоскостей (трех сегментов). Для каждого сегмента запишем уравнение плоскости, используя средние значения коэффициентов A_m , B_m , C_m , D_m . Например, для сегмента (i) , в котором n треугольников, можно составить свое уравнение плоскости, используя выражение (1) в виде

$$A_{im}x + B_{im}y + C_{im}z + D_{im} = 0,$$

$$\text{где } A_{im} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ij}}{n}; \quad B_{im} = \frac{\sum_{i=1}^n B_{ij}}{n}; \quad C_{im} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij}}{n};$$

$$D_{im} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{ij}}{n}.$$

На рис. 3 а показано несколько разных объектов с их характерными точками, обозначенными черными кружками. Например, рассмотрим конкретную точку А – точку пересечения трех плоскостей (сегментов i , j , k), как показано на рис. 3 б. Координаты точки А можно найти, решив систему уравнений

$$\begin{cases} A_{im}x + B_{im}y + C_{im}z + D_{im} = 0 \\ A_{jm}x + B_{jm}y + C_{jm}z + D_{jm} = 0 \\ A_{km}x + B_{km}y + C_{km}z + D_{km} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

В результате решения системы уравнений (2) определяем параметры характерной точки А [3, 4, 10]:

векторы $\vec{V}_{A_{jk}}$, $\vec{V}_{A_{ij}}$, $\vec{V}_{A_{ik}}$, совпадающие с линиями пересечения двух плоскостей (i, k) , (i, j) и (j, k) ;

углы $\alpha_{A_{jk}}$, $\alpha_{A_{ik}}$, $\alpha_{A_{ij}}$ между двумя векторами $(\vec{V}_{A_{jk}}, \vec{V}_{A_{ij}})$, $(\vec{V}_{A_{ij}}, \vec{V}_{A_{jk}})$ и $(\vec{V}_{A_{jk}}, \vec{V}_{A_{ik}})$.

Эти параметры используются для определения конфигурации характерных точек в пространстве и вида связи между ними.

Определение пространственного расположения характерных точек. Для определения геометрического расположения и связей характерных точек рассмотрим пример мо-


$$2) (\alpha_{12}^A = \alpha_{12}^B) \& (\alpha_{23}^A = \alpha_{13}^B) \& (\alpha_{13}^A = \alpha_{23}^B);$$

Рис. 5. Параметры точки В₁

X_A	Y_A	Z_A	α_{12}^A	α_{23}^A	α_{13}^A	d_{12}^A	d_{23}^A	d_{13}^A	D_{12}^A	D_{23}^A	D_{13}^A	M_1^A	M_1^A	M_1^A
-------	-------	-------	-----------------	-----------------	-----------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	---------	---------	---------



$$3) (\alpha_{12}^A = \alpha_{23}^B) \& (\alpha_{23}^A = \alpha_{12}^B) \& (\alpha_{13}^A = \alpha_{12}^B);$$

$$4) (\alpha_{12}^A = \alpha_{23}^B) \& (\alpha_{23}^A = \alpha_{12}^B) \& (\alpha_{13}^A = \alpha_{13}^B);$$

$$5) (\alpha_{12}^A = \alpha_{13}^B) \& (\alpha_{23}^A = \alpha_{12}^B) \& (\alpha_{13}^A = \alpha_{23}^B);$$

$$6) (\alpha_{12}^A = \alpha_{13}^B) \& (\alpha_{23}^A = \alpha_{23}^B) \& (\alpha_{13}^A = \alpha_{12}^B).$$

Далее рассмотрим другие характерные точки объекта, соединенные ребрами с точкой А, и последовательно сравним их с такими же точками на модели. Если конфигурация точек совпадет, то перейдем к анализу следующей характерной точки на объекте. По результатам анализа делаем вывод о степени совпадения реального объекта и его модели.

Результаты экспериментальных исследований. Для экспериментальной проверки предложенного алгоритма на мобильный робот была установлена 3D система технического зрения и написана программа обработки визуальной информации. Результаты показали, что система позволяет точно распознавать многогранные объекты и может использоваться в системе управления мобильного робота.

На рис. 6 показана последовательность анализа и распознавания куба с восемью вершинами (характерных точек). Реальные изображения, полученные от 3D камеры, приведены на рис. 6 а. Результаты процедуры сегментации изображены на рис. 6 б. Далее показано выделение восьми харак-

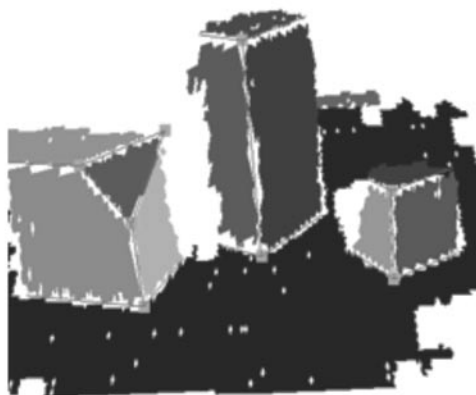
а)



б)



в)



г)

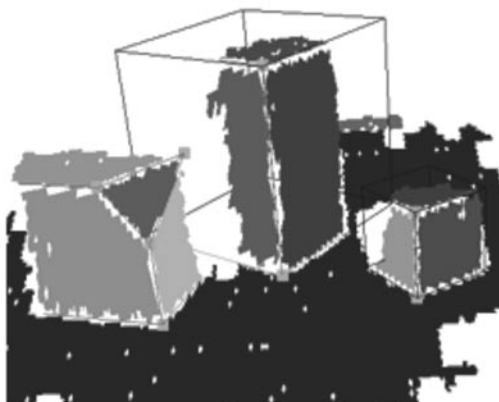


Рис. 6. Последовательность анализа 3D изображения:
а – исходное изображение; б – результат сегментации; в – характерные точки; г – результат распознавания

терных точек (рис. 6 в), а на рис. 6 г видны результаты сравнения характерных точек реального объекта с точками модели. Как видно из рисунка, программа успешно распознала два прямоугольных объекта: куб и параллелепипед.

Все результаты распознавания заносятся в выходной файл следующего вида:

Results of the recognition process

number of answers: 2

Answer 1

Answer rating (%) = 25 %

Answer scale A/B = 2.24376

Point A = 1

Coordinate A 24.3376 ; -225.019 ; -1307.88

Point B = 1

Type of match points A and B= 3

Answer 2

Answer rating (%) = 25 %

Answer scale A/B = 0.907068

Point A = 3

Coordinate A 134.445 ; -240.276 ; -1248.22

Point B = 1

Type of match points A and B= 3

Предложен алгоритм описания пространственных объектов, которые ограничены плоскостями.

Изучен алгоритм распознавания 3D объектов с использованием характерных точек.

Исследованы процедуры сравнения изображения реальных объектов с их моделями.

Написана программа распознавания и приведены результаты ее испытаний с реальными объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин, Ю.С. Калибровка системы трехмерного зрения со структурной подсветкой при помощи плоских объектов [Текст] / Ю.С. Володин, А.В. Орлов, Б.Б. Михайлов // Труды Междунар. конф. с элементами науч. школы для молодежи. — СПб.: Политехника-сервис, 2010. — С. 314–322.

2. Хрущ, А.В. Алгоритм распознавания препятствий для системы трехмерного технического зрения мобильного робота [Текст] / А.В. Хрущ // Труды VIII Всерос. науч.-практич. конф. — СПб., 2005. — С. 257–262.

3. Канатиков, А.Н. Аналитическая геометрия: Учебник для вузов [Текст] / А.Н. Канатиков А.П. Крищенко. — 3-е изд.; Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 388 с.

4. Gonzales, Antonio. Алгоритм выбора эталонов для навигации мобильных роботов с помощью системы технического зрения [Текст] / Antonio Gonzales, Б.Б. Михайлов // Труды Междунар. конф. с элементами науч. школы для молодежи. — СПб.: Политехника-сервис, 2010. — С. 241–246.

5. Гуров, А.Б. Программный комплекс системы технического зрения мобильного робота [Текст] / А.Б. Гуров, Б.Б. Михайлов // Труды

XXI Междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Политехника-сервис, 2010. — С. 479–487.

6. Володин, Ю.С. Использование телевизионной системы объемного зрения для обнаружения препятствий [Текст] / Ю.С. Володин, Б.Б. Михайлов // Матер. Междунар. конф. с элементами науч. школы для молодежи. — СПб.: Политехника-сервис, 2009. — С. 179–181.

7. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Оппенгейм, Р. Шафер. — Изд. 2-е, испр. — М.: Технофераб, 2007. — 856 с.

8. Форсайт, Дэвид А. Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / Дэвид А. Форсайт, Жан Понс; Пер. с англ. — М.: ИД «Вильямс», 2004. — 928 с.

9. Визильтер, Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий [Текст] / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Ососков, А.В. Моржин. — М.: Физматкнига, 2010. — 672с.

10. Ким, Н.В. Анализ дорожной ситуации с использованием систем технического зрения [Текст] / Н.В. Ким, А.Г. Кузнецов, С.Ю. Косоруков // Труды XXI Междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Политехника-сервис, 2010. — С. 475–479.

REFERENCES

1. Volodin Iu.S., Orlov A.V., Mikhailov B.B. Kalibrovka sistemy trekhmernogo zreniia so strukturnoi podsvetkoi pri pomoshchi ploskikh ob"ektov / Trudy Mezhdunar. Konf. s elementami

nauchnoi shkoly dlia molodezhi. — St.-Petersburg: Politekhnikha-servis, 2010. — S. 314–322. (rus)

2. Khrushch A.V. Algoritm raspознаvaniia prepiatstvii dlia sistemy trekhmernogo tekhnicheskogo



zreniia mobil'nogo robota / Trudy VIII Vseros. nauch.-praktich. konf. — St.-Petersburg, 2005. — S. 257–262. (rus)

3. **Kanatikov A.N., Krishchenko A.P.** Analiticheskaya geometriia: Uchebnik dlia vyzov. — 3-e izd.; pod red. V.S. Zarubina, A.P. Krishchenko. — Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2002. — 388 s. (rus)

4. **Gonzales Antonio, Mikhailov B.B.** Algoritmy vybora etalonov dlia navigatsii mobil'nykh robotov s pomoshch'iu sistemy tekhnicheskogo zreniia /Trudy Mezhdunar. Konf. s elementami nauchnoi shkoly dlia molodezhi. — St.-Petersburg: Politehnika-servis, 2010. — S. 241–246. (rus)

5. **Gurov A.B., Mikhailov B.B.** Programmnyi kompleks sistemy tekhnicheskogo zreniia mobil'nogo robota /Trudy XXI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. — St.-Petersburg: Politehnika-servis, 2010. — S. 479–487. (rus)

6. **Volodin Iu.S., Mikhailov B.B.** Ispol'zovanie

televizionnoi sistemy ob"emnogo zreniia dlia obnaruzheniia prepiatstviu / Mater. Mezhdunar. konf. s elementami nauchnoi shkoly dlia molodezhi. — Politehnika-servis, 2009. — S. 179–181. (rus)

7. **Oppengeim A., Shafer R.** Tsifrovaia obrabotka signalov. — Izd. 2-e, ispr. — Moscow: Tekhnoferab, 2007. — 856 s. (rus)

8. **Forsait Devid A., Pons Zhan.** Komp'iuternoi zrenie. Sovremennyi podkhod; Per.s angl. — Moscow: ID «Vil'iams», 2004. — 928 s. (rus)

9. **Vizil'ter Iu.V., Zheltov S. Iu., Bondarenko A.V., Ososkov M.V., Morzhin A.V.** Obrabotka i analiz izobrazhenii v zadachakh mashinogo zreniia: Kurs lektsii i prakticheskikh zaniatii. — Moscow: Fizmatkniga, 2010. — 672 s. (rus)

10. **Kim N.V., Kuznetsov A.G., Kosorukov S.Iu.** Analiz dorozhnoi situatsii s ispol'zovaniem sistem tekhnicheskogo zreniia / Trudy XXI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. — St.-Petersburg: Politehnika-servis, 2010. — S. 475–479. (rus)

НГУЕН Ань Ван — аспирант кафедры РК10 Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

105037, Россия, Москва, Измайловская пл., д. 7.

E-mail: robot@bmstu.ru

NGUYEN, Anh V. Bauman Moscow State Technical University.

105037, Izmaylovskaya square 7, Moscow, Russia.

E-mail: robot@bmstu.ru

МИХАЙЛОВ Борис Борисович — доцент кафедры роботов и робототехнических систем Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, кандидат технических наук.

105037, Россия, Москва, Измайловская пл., д. 7.

E-mail: robot@bmstu.ru

MIKHAILOV, Boris B. Bauman Moscow State Technical University.

105037, Izmaylovskaya square 7, Moscow, Russia.

E-mail: robot@bmstu.ru

Конференции



Конференция по программной инженерии «Инструменты и методы анализа программ-2013»

С 10-го по 12-е октября 2013 года в Костроме прошла первая научно-практическая конференция по программной инженерии «Инструменты и методы анализа программ» (Tools and Methods of Program Analysis 2013, TMPA-2013). Организаторами конференции выступили Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), Институт проблем информатики РАН (ИПИ РАН), Костромской государственный технологический университет (КГТУ) и компания ООО «Инновационные Трейдинговые Системы», также конференция получила поддержку ассоциации IEEE.

Тематика конференции связана с актуальными направлениями программной инженерии, такими, как

- автоматизация тестирования программного обеспечения;
- статический анализ программ;
- верификация;
- динамические методы анализа программ;
- тестирование и анализ параллельных и распределенных систем;
- тестирование и анализ высоконагруженных систем и систем высокой доступности;
- анализ и верификация программно-аппаратных систем;
- методы создания качественного программного обеспечения;
- инструментальные средства анализа, тестирования и верификации.

В программный комитет вошли ведущие российские ученые в области программной инженерии, а также несколько представителей зарубежных университетов. Сопредседатели программного комитета: профессор В.Н. Захаров (ИПИ РАН), доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий СПбГПУ В.М. Ицыксон и декан факультета автоматизированных систем и технологий КГТУ Ю.Л. Лустгартен, координацию работы осуществлял И. Иткин (ООО «Инновационные Трейдинговые Системы»).

На конференции были представлены приглашенные доклады, конкурсные доклады и круглые столы. С приглашенными докладами выступили профессор СПбГПУ, заведующий кафедрой распределенных вычислений и компьютерных сетей Ю.Г. Карпов, тема доклада «Верификация параллельных программ: современный этап и перспективы» и профессор МГУ, руководитель лаборатории математических проблем компьютерной безопасности В.А. Захаров с докладом «Математические аспекты задачи обфускации программ».

Конкурсные доклады были распределены по пяти трекам: «Верификация», «Анализ программ», «Тестирование», «Аппаратные системы» и «Трейдинговые системы». Доклады на них представлены учеными, аспирантами и студентами ведущих российских университетов и академических институтов: МГУ, СПбГУ, СПбГПУ, СПбИТМО, ЯрГУ, КГТУ, ИСП РАН, ИПИ РАН, также среди авторов докладов были зарубежные представители (из Великобритании, Германии и Украины). На практической части конференции свои доклады представили несколько компаний-разработчиков программного обеспечения.

Все поданные конкурсные статьи прошли процедуру слепого рецензирования. На каждую статью было получено от трех до пяти рецензий, написанных ведущими учеными в области программной инженерии. Всего было получено более 120 рецензий, которые не только помогли программному комитету отобрать лучшие статьи для представления на конференции, но и стали полезной обратной связью для студентов, аспирантов и молодых ученых. Учет мнения признанных авторитетов в области программной инженерии позволит им в будущем подготавливать более качественные и конкурентоспособные статьи.

Всего на конференцию было подано 40 статей, из которых одна была снята авторами, четыре отклонены на стадии предварительного рецензирования, 18 приняты как регулярные доклады, 8 – как краткие сообщения, 9 статей были отклонены после основного рецензирования. Таким образом, доля принятых статей (acceptance rate) составила 0,45 для регулярных статей и 0,65 для всех, что является неплохим уровнем для конференции, проводимой впервые.

В программе также состоялись два круглых стола «Нешаблонные методы тестирования трейдинговых систем» и «Как написать хорошую научную статью». В ходе дискуссий между участниками прошел живой обмен мнениями на актуальные темы, особенно полезный для присутствовавших студентов и аспирантов.

В настоящее время на сайте конференции (<http://tmpaconf.org>) доступны презентации участников, планируется размещение сборника статей и видеозаписей докладов.

В работе конференции приняло участие более 150 человек, среди них известные ученые, представители компаний разработчиков программного обеспечения, аспиранты и студенты. В планах организаторов сделать эту конференцию ежегодной, постепенно повышая уровень докладов, переходить на прием докладов на английском языке и приглашать в состав программного комитета ведущих мировых ученых в области программной инженерии. Объявление о следующей конференции «ТМРА-2014» в ближайшее время появится на сайте.

Сопредседатель программного комитета конференции ТМРА-2013

В.М. Ицыксон

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»
«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

№ 5 (181) 2013

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Редакция журнала

канд. техн. наук, д-р экон. наук, профессор *А.В. Бабкин* – научный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 28.10.2013. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,81. Уч.-изд. л. 15,81. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускался в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

Сведения о публикации представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Периодичность выхода журнала — 6 номеров в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук — 8–15 страниц формата А-4; аспирантов — 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.1-2003).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул — в редакторе **MythType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт — **TNR**, размер шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева — 3 см, сверху, снизу — 2,5 см, справа — 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова (5–7) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;
- аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;
- рецензия на имя зам. главного редактора, подписанная специалистом, имеющим ученую степень доктора наук и/или ученое звание профессора. Рецензия должна быть **ОБЯЗАТЕЛЬНО** заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу <http://journals.spbstu.ru>

2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться **ДОСРОЧНО**.

Более подробную информацию можно получить:

на сайте журнала <http://ntv.spbstu.ru>

по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10⁰⁰ до 18⁰⁰ Галина Александровна

или по e-mail: infocom@spbstu.ru